

第一章 机器人的概述

§ 1-1 机器人的地位

一 机器人的定义与机器人技术

机器人技术是研究机器人工程技术的学问。关于机器人各国有不同的定义，其中一种定义的方法是“机器人是可通过感觉与智能进行作业并具有与人或动物相似的外观和机能的机械”。上述的定义是强调“可进行作业”的性质。而机器人的感觉机能和移动机能只不过是进行作业时必要的辅助机能而已。这里所说的作业并不是单一的简单工作，而是能够进行多种动作的作业。即具有通用性(或柔性)工作的能力。例如，数控机床加工工件的能力虽然很强，但是它不能进行其它的作业，所以不能称它为机器人，此外数控机床的外观也很少有与生物相似之处。

按照上述的定义，机器人的组成如图 1-1 所示。即机器人是由下列几部分组成的。

1. 由作业的手臂和用以行走的双脚构成的“动作机能”；
2. 监视作业进行情况和检测作业周围环境的“传感器”；
3. 根据感觉到的信息和作业情况判断和决定机器人应该进行什么动作的“头脑(人工智能)”。

虽然机器人的模型是动物或人，但是企图给机器人赋予人类那样的高度机能是不可能的。例如，在需要高级的认识与判断的地方，还必须有人帮助，就是非常高级的机器人也还必须进行人机对话才行。图1-1就是说明了机器人和人、机器人和作业对象间的这一关系模式。图1-2是上述关系的详细模式图。

图1-2是具有高度机能的机器人组成与环境信息、控制信息间的传递示意图。

首先，将作业机能分为作业机能与行走机能，上肢担负作业机能，下肢担负行走机能。从强调机器人作业性的角度来看，起主要作用的是上肢，即手指与手臂。以上肢进行作业时，必须实时地将作业状态进行反馈。为此，作业信息是通过装设在上肢上的触觉传感器与起到耳目等作用的非接触传感器进行反馈的。此外还要知道作业对象的位置信息和机器人的周围环境，上述的传感器就是担当这一任务的。

下肢的机能主要是完成行走与机身的保持动作。但是，如得不到地面与壁面的信息，则不会得到满意的行走机能。图中的躯干部，对人来说是收纳内脏器官和保持人身形状的部分；对机器人而言，它是安装用以作业的手臂及能源的，也是非常重要的部分。

进行作业或行走时所需要的信息可分成两部分，一是内部的状态信息，二是包括作业状态在内的外部环境信息。前者用的是内部传感器，后者用的是外部传感器。这些信息都进入机器人的智能部分，根据数据判断后得出行动指令。如果机器人具有学习机

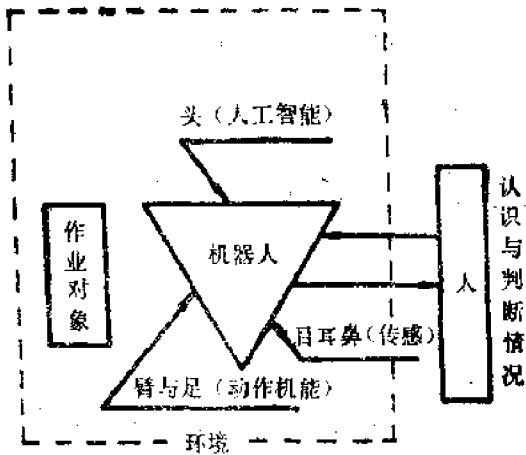


图1-1 机器人的组成

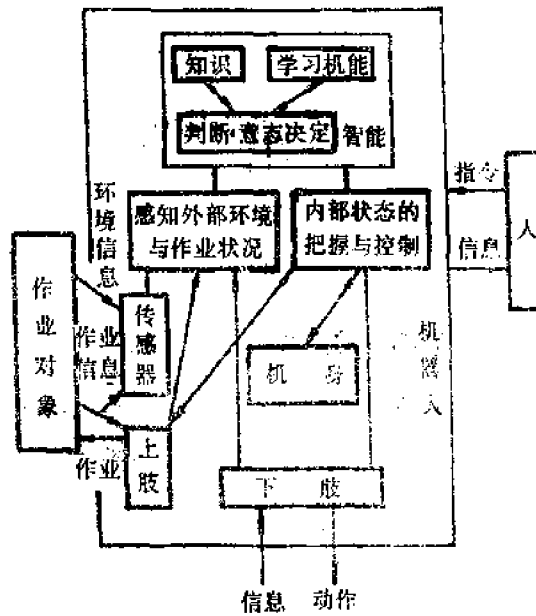


图1-2 机器人的组成与外部的关系

能，那么它的机能就更高了。由于这样的机器人与人类相比其智能还是相当低下的，所以对更高级的信息要完成认识与判断还要依靠人。因此，人还有向机器人发出具体作业以及完成作业的方法与途径指令的作用。

二 机器人的研究课题

如图1-3表示机器人的各个研究领域。

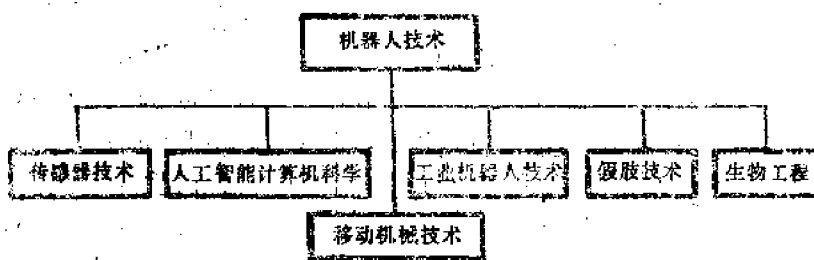


图1-3 机器人技术的研究领域

具体来说，机器人技术是由以下几部分组成的：

- (1) 得到与人类感觉机能相似的传感器技术；
- (2) 得到与人类智能或控制机能相似能力的人工智能或计算机科学；
- (3) 假肢技术；
- (4) 把人类作业技能具体化的工业机器人技术；

- (5) 实现动物行走机能的行走技术；
- (6) 以实现生物机能为目的的生物学技术等。

从事机器人技术与设计的人应该具备以上各个领域内的有关知识。

§ 1-2 机器人中的主要技术

一 机器人的发展目标是自动作业机器人

现在用于工业中的工业机器人大部分是固定式并且没有行走机构。今后这种机器人也将占主导地位。但是进行更高级作业的机器人就与此不同了，为了实现高度的机能还必须要有行走机构。但是，目前就是具有高度作业机能的固定式机器人还没有达到实用的程度，如若加上行走机能就使问题更加复杂了。比如说，即使在台阶或凹凸不平的路面上行走的机能解决了，控制技术也没问题了，那么使机器人能进行正常作业所需的能源问题就变得非常重要了。

如上所述，能够行走进行作业并带有能源与控制装置的机器人叫自动作业机器人。在行走范围很小时并不一定需要自动形的，但是为了有效地利用作业能力，还是希望优秀的机器人是自动形的。如把自动作业机器人所消耗的能量定性地与无人工厂使用的无人运输车进行比较，其结果如表1-1与图1-4所示。

表 1-1 自动作业机器人的
能量消耗地点

组成元件	移动车	无人运输车	自动作业机器人
(1) 移动机构		两轮独立驱动形，汽车形	步行，吸附移动，全方位移动，汽车形等
(2) 传感器		路径引导用，防止冲突用	视觉，听觉，触觉位置方向感觉等
(3) 控制装置(计算机)		一般没有	微机系统，接口
(4) 作业用手臂机构		没有	机械手
(5) 信息传递装置		基本上没有	有

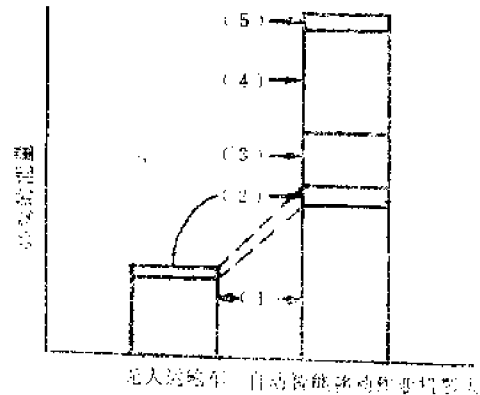


图1-4 自动作业机器人与无人运输车的能量比较

上面只是比较了自动作业机器人中确保能 [(1)~(5)是与表1-1中相对应的]

源的难度与节能技术的必要性，然而对所有的机能来说，如为自动形则问题的难度成倍地增加。例如，视觉认识技术等，如用以前的作法则需要非常大型的计算机与较长的认识时间。当然视觉信息处理过程的各部分正在用信息处理机而逐步得到改善，但是作为自动作业机器人的视觉所要求的实时性与处理装置小型化问题还没有得到解决。操作作业技术也是如此。目前正在研究作业性能高的力矩控制机能的机械手，这与普通的机械手相比必须有大的能源与大量的控制装置。

如上所述，机器人的最高目标是研制自动作业机器人，但是随之也带来了许多难

题, 为此与设计普通的计算机控制和机械机构等不同的是尚需要进行热工学与材料学等学科的研究与开发。到目前为止, 机器人技术大都是以智能性为中心进行研究的, 但是欲研究更高机能的机器人时, 就与更广泛的科学领域有关了。

二 构成自动作业机器人的主要技术

前一节概要地介绍了机器人的定义及其主要机能, 在此再较具体地说明构成自动作业机器人的主要技术, 如图1-5所示。

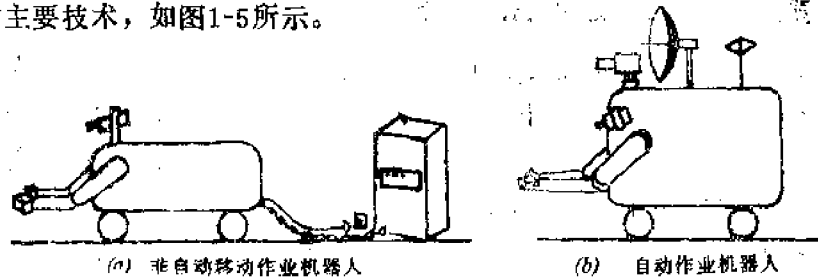


图1-5 非自动移动机器人与自动作业机器人

(a) 非自动移动机器人, (b) 自动作业机器人

这些主要技术是, ① 进行作业的操作技术; ② 使机械手能够接近作业对象而充分发挥作业机能的移动技术; ③ 能获得作业状态、周围环境以及移动环境等信息的传感技术; ④ 处理机械手、移动机能以及传感信息的信息处理技术; ⑤ 以人的高度机能补助机器人的有限认识和判断机能的人机对话技术; ⑥ 以具体形式维持这些机能, 搭载能源, 进而按作业对象去改变手部安装场所等构成的机身技术等。这6种技术是研制自动作业机器人中不可缺少的技术。具体实现上述6种技术的代表性机构与机能如表1-2所示。

表 1-2

自动作业机器人的主要技术

① 操作技术	机械手、手
② 移动技术	全方位移动机构, 台阶升降机构, 步行机构
③ 传感技术	视觉, 听觉, 触觉, 嗅觉, 温湿觉
④ 信息处理·人工智能技术	人工智能, 控制技术, 通讯技术
⑤ 人机对话技术	显示装置, 指令装置, 感觉提示装置, 通讯技术, 电传技术
⑥ 机身	能源, 节能技术, 收纳技术, 材料技术

§ 1-3 工业机器人的分类及应用范围

一 工业机器人的分类

工业机器人的分类方法很多, 而且各国的分类方法也不尽一致, 下面只介绍两种常用的分类方法。

一般按输入信息, 示教方法分类如下:

1. 机械手 具有与人类上肢相似的机能, 可使对象物在空间内移动。

2. 人操纵机械手 由人操纵的机械手。
3. 程序机器人 按预先规定的顺序、条件及位置使动作的各阶段进行下去的机械手。
4. 固定程序机器人 按预先规定的顺序、条件及位置使动作的各阶段依次进行下去的机械手，它是不容易改变给定指令的。
5. 可变程序机器人 按预先规定的顺序、条件及位置使动作的各阶段依次进行下去的机械手，它是容易改变给定指令的。
6. 示教再现机器人 通过预先由操作者使机械手运动进行动作的示教，把其作业顺序、位置及其它信息记忆下来，需要时读出而进行作业的机械手。
7. 数控机器人 按顺序、位置及其它数值信息而进行作业的机械手。例如用穿孔纸带、卡片或数值开关等工作。

8. 智能机器人 通过感觉机能或认识机能可以自己决定行动的机器人。

另一种分类方法是按动作的形态进行分类，即机器人是由什么样的单位动作组成的，其分类如下（结构可参阅图2-2）：

1. 圆柱坐标机器人 运动主要是圆柱坐标形式的机械手。
2. 极坐标机器人 运动主要是极坐标形式的机器人。
3. 直角坐标机器人 运动主要是直角坐标形式的机器人。
4. 多关节机器人 运动主要是由多关节构成的机器人。

二 工业机器人的应用范围

工业机器人是机械技术与电子技术相结合的典型先进技术产品，它在工厂自动化及柔性生产系统等新的生产系统中起着核心的作用。

在最近的五年间，人操纵机械手及固定程序等控制方法比较简单的机器人的应用比例在下降，而相继取代它们的是示教再现机器人、数控机器人及智能机器人等控制方法高级的机器人；这些机器人的应用比例在急剧地增大。

工业机器人目前多数用在制造业中，但是在原子能工业、海洋开发、土木建筑业、服务行业及医疗等非制造业中的利用也在逐步发展。

机器制造业是工业机器人的活动舞台，其中汽车制造业、电气器具制造业、塑料成型加工业及机床制造业等用的较多。特别是在电气器具制造业中，电子元件的装配及向电路板上插入半导体元件与电容器等都大量地使用数控机器人。据统计，1980年以后用于汽车制造业机器人的数量也开始增加了。此外喷涂、焊接及切削加工等的用量也在增长。

机械手的发展历史是相当长的，19世纪40年代出现的原子能用机械手就是其历史的开端。后来随着自动化与电子技术的发展，到目前正是工业机器人发展的全盛时期。在日本，无论是机器人的生产量还是使用量都是世界第一位的。据统计，1984年日本生产各种机器人42000台，目前在各种生产线上使用的有164000台；英国1984年有870台投入使用；而西德据1985年的统计，其使用量已达8500台左右。

我国近几年各科研机关及高等院校也开始了各种用途机器人的研制工作。北京机械

工业自动化研究所研制的液压驱动的有关节式喷漆机器人，浙江大学研制的6自由度关节式液压伺服机械手，哈尔滨工业大学研制的华宇-II型弧焊机器人和东方-I型喷漆机器人等都通过了技术鉴定。此外各有关单位已建立了机器人的专门研究队伍，正在从事各种用途机器人的研究。这说明我国已经揭开了机器人研究的序幕，在“七五”计划中，我国的机器人研制工作将有更大的发展。

第二章 机械手的结构与控制

§ 2-1 绪 言

在工厂中使用机器人与机械手已有20多年的历史了。在这段时间里，随着工业技术的发展，对工业机器人的要求也与日俱增，对能够实现高级作业机器人的要求日益迫切。因此很多研究机关在研究机器人，硬件与控制技术方面都取得了很大的进步。

从硬件来说，最初的机械手以旋转与滑动平移为主要结构，这种结构是很复杂的，后来逐渐变成与人臂相似的多关节形了。从机构的自由度来看，也不局限于空间内固定物体至少要有6个自由度的概念，出现了可自由变化姿势的多自由度机械手。

关于传感器，除了检测位置的电位计和编码器之外还装有触觉、力觉、压觉与视觉等传感器，在传递环境信息方面，使用了更高级的技术，从而可实现从事比人能从事的更复杂的作业了。

随着硬件的进步，相应地开发了很多控制技术。特别是多关节机械手的控制，从计算量的角度来看是非常复杂的，可以说没有计算机是无法实现的。

以数控机床为例，最初是采用录返形的点到点(PTP)控制，但是并不单纯地进行位置控制，又把力反馈控制或速度、加速度考虑在内，发展成为动力控制。

现在的工业机器人，其中大部分是用来进行搬运零件、喷涂或焊接等作业，因此以机械来代替人的手臂机能。这样，把对象物握住之后再把它移动到某一指定的目的地，或者给对象物加以必要的力等，这些作用就是手或手臂的机能，这就叫做操作，能够完成上述机能的就叫做机械手。在第一章中对机械手的定义是：具有人类上肢机能，使对象物在空间内进行移动的机械装置叫机械手。本书为了讨论问题方便，对机械手作如下的具体定义：机械手是由臂、手腕和手部组成的。而臂是具有与人类胳膊类似机能的部位；手腕是位于胳膊的端部具有维持手部机能的部位；手部是具有类似人的手指与手掌机能的部位(见图2-1)。

从世界上机器人发展的总形势来看，工业机器人多数还是以示教再现为基础的，其作业能力还相当低，一般还不能适应高精度的安装作业，所以各研究机关正在研制比工业机器人更高级的自适应机器人和高智能的机器人。

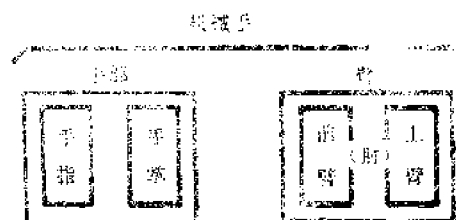


图2-1 机械手的定义

§ 2-2 机械手的结构

一 机械手的结构概述

一般为了把刚体固定在3维空间内,必须有刚体的3个位置与3个方向的自由度,即6个约束条件。因此对机械手而言,为了完全实现对于对象物的操作,必须在手部有6个可以自由调节自由度的机构。一般机械手是由几根连杆组成,各连杆是通过俯仰(旋转轴与连杆轴垂直)、旋转(旋转轴与连杆轴平行)和滑动等关节机构连接,依其动作的不同状态可分成圆柱坐标形、极坐标形、直角坐标形与多关节形。圆柱坐标形与极坐标形其结构比较简单,对于直角坐标系来说,由于一般作业空间多半可看成直角坐标系,所以控制是比较容易的。对于多关节形来说,作业空间也变得大了,虽然一般可实现人臂的巧妙动作,但其控制的难度较大。图2-2是各种结构的示意图。

驱动各关节的执行机构,一般用电马达、液压执行机构与气动执行机构。表2-1列出了各种执行机构的特点。

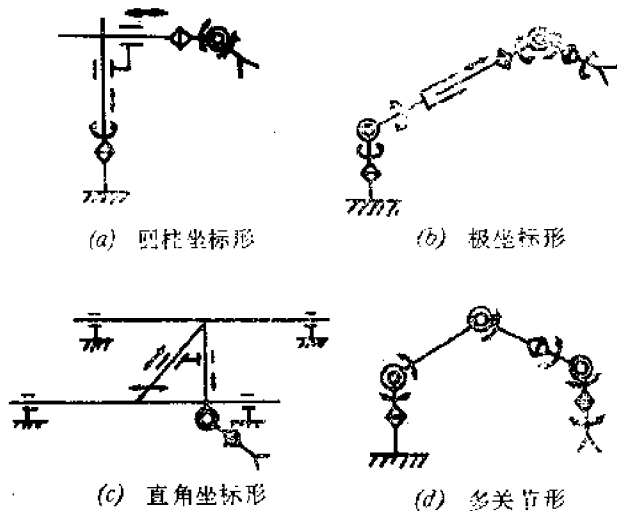


图2-2 机械手的结构图

表 2-1 各种执行机构的特点

	电动式	液压式	气动式
操作力	可得到中、小程度的操作力 一般得到的是力矩	操作力非常大 可得到力矩或直线驱动力	不能产生大的力 一般是直线驱动力
快速性	由于出现了中低惯性电机而变快 中小功率者与液压相近	力矩-惯性比大 容易得到高速响应	一般不易得到高速响应 但是由于管路损失小,简单运动时可得到高于液压的响应
尺寸大小、重量	比较好 尺寸范围广	重量·尺寸大小/功率,非常高 但液压能源占空间	比液压差 小型低功率的有利用价值
安全性	对过负载能力弱 必须考虑防爆 其它安全性高	有一定发热 对过负载能力弱 火灾时危险	对过负载能力强 无发热 对人体危险小
易操作性	附属设备全,检查容易	须注意工作油管理,管路冲洗和滤油器管理	除去空气中水分,考虑润滑性等比液压容易
寿命	由可控硅的固体电路驱动得到了改善	因油有润滑性故机械寿命长	因空气无润滑性与液压、电驱动相比较低
成本	一般	价格及运转费都高	成本低

一般使用电动马达时,通过流入马达的电流来调节各关节处的力矩,叫做力矩(或力)

指令形。当使用液压执行机构或气动执行机构时，在各执行机构中设有伺服回路，对加入各关节的角度或位置指令进行控制，构成位置指令形的机械手。当电动马达也是由电位计或编码器构成反馈回路进行伺服控制，或使用脉冲马达时也就变成位置指令形了。

下面介绍几种在结构上有特点的机械手。

1. 美拉姆

美拉姆 I 是日本通产省工业技术院技术研究所研制的一对人臂形机械手。其结构是与人类臂完全相同的有 7 个自由度的关节形，有一个多加的冗余自由度。在各关节处装有角度与力矩反馈用的传感器，也可以进行力的控制。用此机械手进行 2 个臂的协调控制，以及通过一个冗余自由度进行回避障碍物控制的研究。美拉姆 II 是把美拉姆 I 的执行机构改成液压驱动，在世界上首先去掉了使用减速器的缺点，而各自由度都是采用直接驱动的。

2. 具有力控制机能的机械手

在上述工业技术研究院的电子技术综合研究所研制了有力矩控制机能的多关节形机械手。它是使用磁粉离合器令各关节处产生与电流成比例的力矩。此外，把执行机构放置在机械手的基座上，通过钢丝绳和滑轮将力矩传到各关节上，以此减轻臂部的重量。

3. 适应形机械手

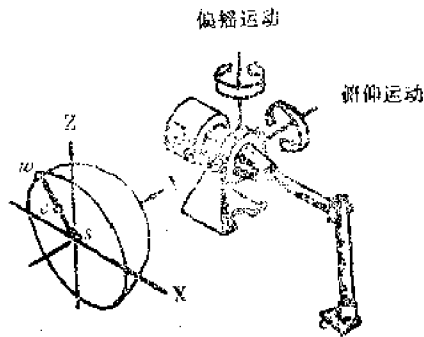
对液压执行机构来说，一般想控制其输出力矩是比较困难的，但是上述机械技术研究所通过改造电液伺服阀研制了能按输入信号产生力的液压执行机构。把这个液压机构用于缩放式 4 连杆机构的圆柱坐标形机械手，这种机械手就叫适应形机械手。由于采用了这种机械手，只要加入简单的指令就可进行连杆的圆滑旋转控制，还可进行一边长为 80mm，间隙为 20 μ m 的方棒插入孔中的作业。

二 齿轮传动多自由度机械手

对远距离的操作与装配系统来说，其要求的性能越来越高。然而不管用传感器的性能多么高或计算机运算速度多么快的控制系统，还是由机械手的硬件性能决定着系统全部的水平，因此研究高性能的机械手的硬件是非常重要的。那么所谓高性能机械手又应该是什么样呢？第一，应该是响应速度快且可得到大的输出力矩；第二，小型轻量化；第三，自由度要多。

一般设计机械手时，尽可能把执行机构装设在可动部分的近旁。为此，若手部需要 3 个自由度时，必须在臂的前端装有 3 个执行机构，这时执行机构的重量对机械手的性能将产生很大的影响。自然，这时就十分需要轻量小型而且是高输出力的执行机构了。因此在研究机械手时，对执行机构的选择与研究是头等重要的事。按上述的想法研制出了新的机械手，这就是 NASA 研制的雷玛 (LEMMA)，它是由伞齿轮与同轴的多重管结构的臂组成的 6 自由度机械手，现简单介绍如下。

LEMMA 是机械手臂实验模型的缩写词，它是用在宇宙飞船上远距离操纵系统中的。虽说在宇宙空间用的机械手没必要对重量过分注意，但是对以前那种关节“生硬”的臂来说，在使用摄象机时则发生使视界变窄的缺点。为此，应尽可能使机械手象人臂那样活动自如。



(ω : 手腕; ω' : 肘; ω'' : 肩)

图2-3 雷玛的外观图

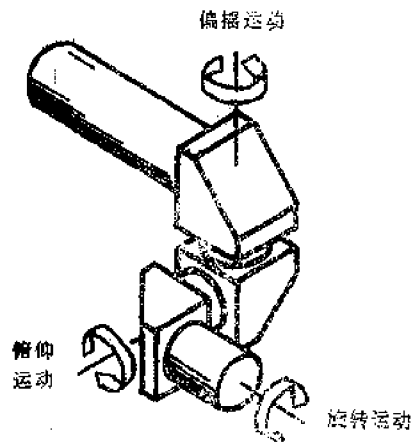


图2-4 手腕的结构图

图2-3是机械手的外观图，而图2-4是手腕的关节图。考虑是在无重力状态下工作，肘关节才可作成偏摇的运动。

为了使设计关节为柔软且活动自如的机械手，必须将执行机构都集中在肩部。因此，为了驱动肘部和手腕处的关节，必须设法将肩部执行机构产生的力矩送到各关节处。雷玛机械手是通过装在同轴的多重空心套管与关节部分伞齿轮来实现的。

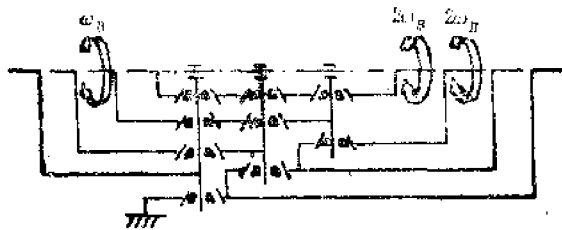


图2-5 肩部差动齿轮原理图

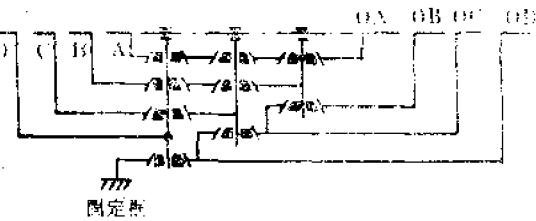


图2-6 B轴旋转运动

图2-5是肩部差动齿轮的原理图。此结构的特点是当旋转输入侧的某一个轴时，在输出侧与其相应内侧各轴的相对位置是不变的。例如，在图2-6中B轴以角速度 ω_B 旋转时，在输出侧，OA与OB轴都以 $2\omega_B$ 的角速度旋转。同样，在图2-7中如C轴以 ω_C 旋转时，则OA、OB与OC轴都以 $-2\omega_C$ 的角速度旋转。

此处输入侧与输出侧角速度的比并不一定是1:1，但这一点对机械手的控制并无多大影响。这种结构的特点是与输入轴对应的各关节互不干扰，所以与以往的机械手相同，其控制方式也是适用的。

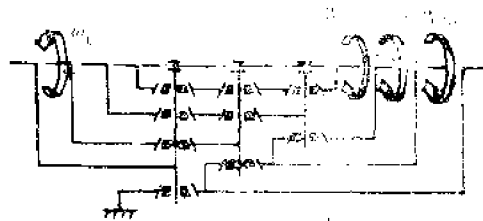


图2-7 C轴旋转运动

图2-8是臂的内部结构。图2-9是伞齿轮组成的关节基本结构图。在此把轴的旋转运动变成关节周围的偏摇运动。图2-10是手腕的关节结构，是两轴的旋转运动变成偏摇与轴的旋转运动。图2-11是肘关节的结构，这部分是最复杂的，四个轴的旋转运动变成关节周围的偏摇运动与三个轴的旋转运动。

如上所述，轴的旋转运动在相对应的关节处变成关节周围的偏摇运动和俯仰运动，这就是这种关节机构的特点。图2-12是各臂部分的同轴套管数与其相互连接的示意图。

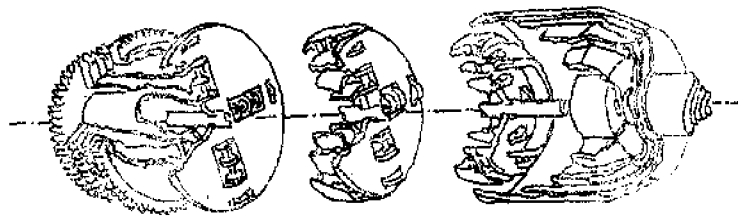


图2-8 臂的内部结构

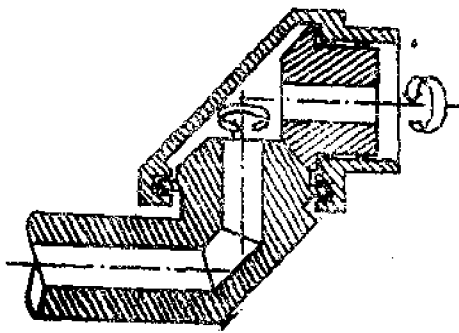


图2-9 关节的基本结构

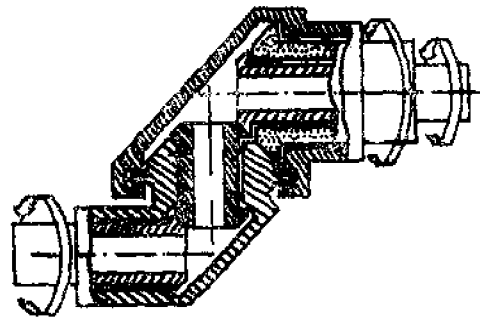


图2-10 手腕的关节结构

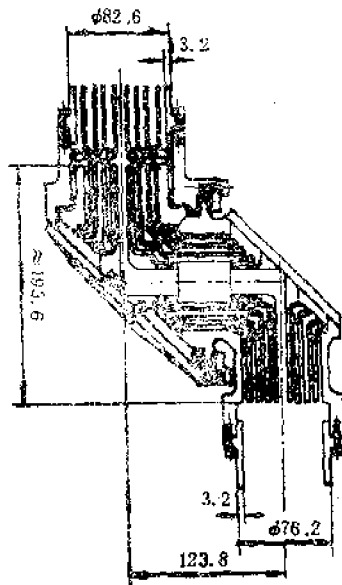


图2-11 肘关节结构

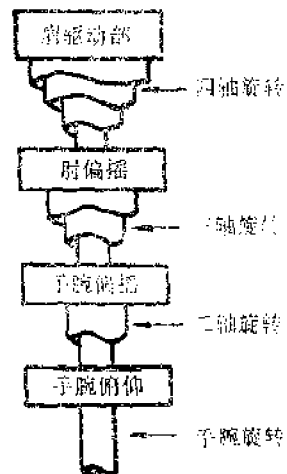


图2-12 由肩到手部的传动机构简图

前面提到的雷玛是完全按照新的构思设计的机械手。此机械手的特点是手部没有执行机构，所以重量轻，另外，轴方向上的转动惯量，理论上可以作得非常小，所以其操作性无疑是好的。另外，从外观上来看，关节周围非常干净利落，这种机械手虽然还在研制中，今后它很可能成为机械手的较好形式之一。

三 马达直接驱动式力矩控制机械手

浅田（现在MIT）等人用稀土类磁铁制的力矩马达，研制了去掉齿轮或皮带轮等传动系统的马达直接驱动形机械手。一般的机械手执行机构是用电马达或液压式的执行机

构，一般马达是容易实现控制的，但是其缺点是在低速时难以得到大的扭矩，必须经过齿轮等减速。如使用齿轮等传动系统则机械手的重量要增大，且由于齿轮间隙及摩擦等使系统的动特性变差，其结果则不可能进行精确的动作或纯力的控制。最近几年美国在宇宙开发方面研制出了超低速大扭矩的力矩马达，这种马达可用于机械手的执行机构。

浅田等人通过给定的简单模型，求出了机械手的最佳结构与各关节内必要的力矩对重量的比值，开发了结构紧凑的机械手。

下面为了求取机械手结构与各关节处力矩，先给定其模型。假设把臂的各关节看成是质点并忽略各连杆的重量，由图2-13可求出绕第*i*关节的力矩 $T_{s,i}$ 。

$$T_{s,i} = \alpha_i \cdot \sum_{j=0}^{i-1} (r_{i,j} \times g) M_j \quad (2-1)$$

$$r_{i,j} = \sum_{k=i+1}^j l_k e_k \quad (2-2)$$

式中 l_k 是连杆的长度； e_k 是表示在连杆方向上的单位向量； M_0 是加在手部的负载， $M_j (j \neq 0)$ 是第 j 关节的质量； α_i 是表示第 i 关节轴方向的单位向量； g 是重力向量； \cdot 是向量的内积； \times 是向量积。

绕第 i 关节周围的转动惯量 I_i 按下式求得

$$I_i = \sum_{j=0}^{i-1} M_j |r_{i,j} \times \alpha_i|^2 \quad (2-3)$$

设各关节处的必要角速度为 α_i ，则第 i 关节所需的最大力矩 $T_{m,i}$ 可用下式求得

$$T_{m,i} = \max [T_{s,i} + I_i \alpha_i], (\theta_i \sim \theta_i) \quad (2-4)$$

假设马达峰值力矩对质量比为 $\beta = M/T$ ，各连杆的长度相等，且所有的关节都是由枢轴构成时，则 $T_{m,i}$ 如图2-14所示状态时为最大，第 i 个马达的质量 \bar{M}_i 可按下面的关系式表示。

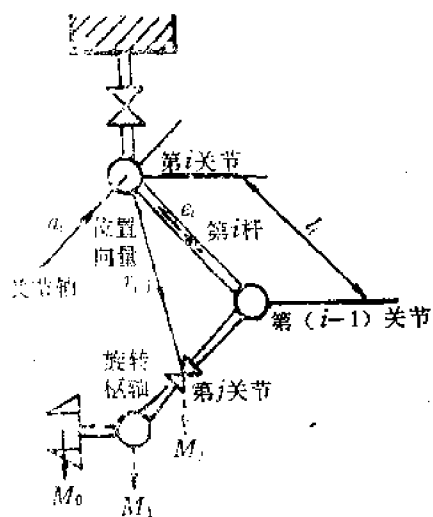


图2-13 直动型机械手的模型

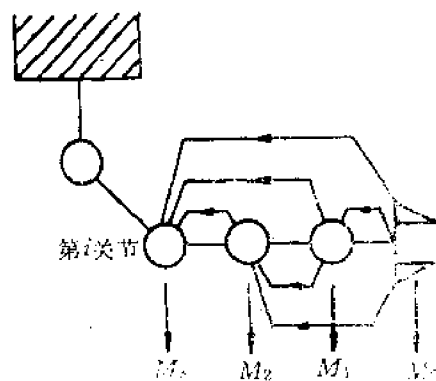


图2-14 各关节负载的影响

$$\bar{M}_i = \beta \sum_{j=1}^{i-1} [(i-j) + (i-j)^2 \alpha] \bar{M}_j \quad (2-5)$$

式中 $\bar{\alpha}$, \bar{M}_i 及 $\bar{\beta}$ 是无因次量, 其值如下

$$\bar{\beta} = \beta l g, \quad \bar{\alpha} = \frac{l}{g} \alpha, \quad \bar{M}_i = \frac{M_i}{M_0}$$

表 2-2 表示了 $\bar{\beta}$ 与各连杆的重量关系, 由表可知 $\bar{\beta}$ 对连杆的轻量化影响是非常大的。

表 2-2 连杆的重量 ($\bar{\alpha} = 0.1$)

马达重量 $\bar{\beta}$	\bar{M}_1	\bar{M}_2	\bar{M}_3	\bar{M}_4	\bar{M}_5	\bar{M}_6	全重量 ($\sum \bar{M}_i$)
1	1.00	3.61	10.51	30.12	86.09	264.04	378.47
0.5	0.55	1.50	3.44	7.57	16.50	35.93	66.48
0.25	0.28	0.88	1.33	2.44	4.38	7.82	17.92

使连杆轻量化的另一个手段是在连杆上下工夫, 尽量减少自重的影响。例如在关节处不用枢轴而用旋转的方法。比如说, 6 个自由度的机械手可能使用的旋转关节最多为 3 个, 余下的 3 个自由度由枢轴构成, 按上述方式组合成的连杆重量比较如表 2-3 所示。

表 2-3 各种结构的连杆重量 ($\bar{\alpha} = 0.1, \bar{\beta} = 0.5$)

结构 (手部) (根部)	马达重量						全重量
	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6	
R-P-R-P-P-P	0	1.20	1.20	4.24	9.08	19.68	36.41
R-P-P-R-P-P	0	1.20	2.61	2.61	9.22	19.76	36.40
R-P-P-P-R-P	0	1.20	2.61	5.68	5.68	20.06	36.22
R-P-P-P-P-R	0	1.20	2.61	5.68	12.34	2.06	25.43
P-R-P-R-P-P	0.55	0.55	2.61	2.61	9.08	19.46	35.86
P-R-P-P-R-P	0.55	0.55	2.61	5.61	5.61	19.76	35.69
P-R-P-P-P-R	0.55	0.55	2.61	5.61	12.17	2.60	25.09
P-P-R-P-R-P	0.55	1.50	1.50	5.68	5.68	19.68	35.59
P-P-R-P-P-R	0.55	1.50	1.50	5.68	12.17	2.73	25.12
P-P-P-R-P-R	0.55	1.50	3.44	3.44	12.34	3.05	25.32
R-P-R-P-R-P	0	1.20	1.20	4.24	4.24	14.69	26.57
R-P-P-R-P-R	0	1.20	2.61	2.61	9.22	2.31	18.95
R-P-R-P-P-R	0	1.20	1.20	4.24	9.08	2.06	18.78
P-R-P-R-P-R	0.55	0.55	2.61	2.61	9.08	2.32	18.72

R: 旋转关节, P: 枢轴关节

图 2-15 是按上述分析结果制作的马达直接驱动式机械手的设计图, 图 2-16 是其关节的结构图。连杆的结构是表 2-3 中最后一种组合, 即 P-R-P-R-P-R 方式, 在手部关节中使用的是 β 小的稀土元素 (钐、钕) 磁铁制的力矩马达。各关节的可动范围是枢轴为 180° , 旋转轴为 360° 。手部的可搬重量为 6kg, 手部的最大速度为 4m/s, 连杆的总重量为 130kg。

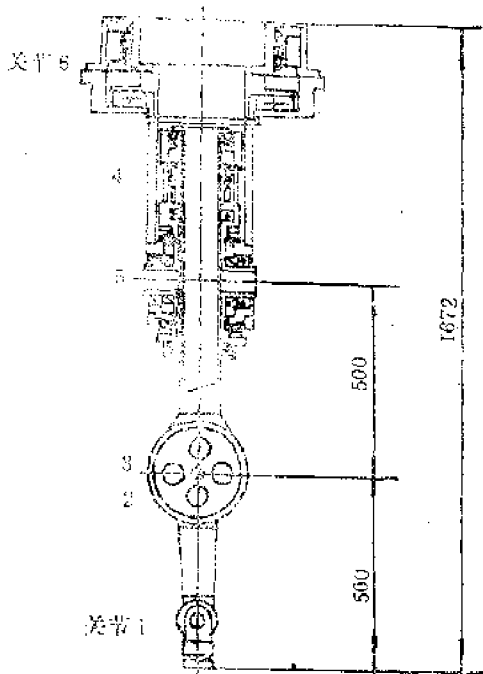


图2-15 直接驱动形连杆的结构

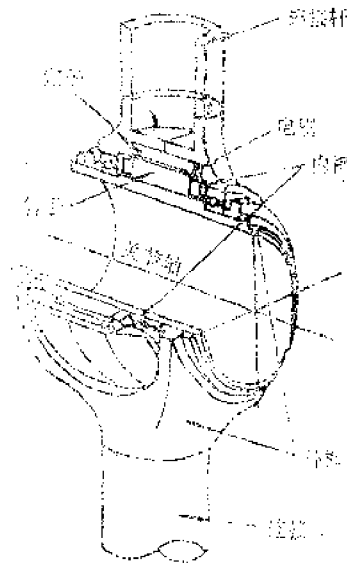


图2-16 关节结构

§ 2-3 机械手控制的基本概念

机械手的手臂可以完成各种动作，但是其中最频繁的动作是使手部沿着给定的轨迹运动。例如，这种动作是把物体握紧，然后送到指定地点的搬运作业，或者是焊接与喷涂作业等。

目前在工厂现场所进行的方式是预先规定轨迹上的几个点，操作者边看边操作机械手，按照试行错误的方法把手部的位置对准到这一点上。这时把机械手执行机构的角度或位置的信息存在记忆装置内，在进行实际作业时将这些信息再依次读出，以点到点（PTP）的方式进行再现。但是这种方法在轨迹复杂以及动作多时，存储器需要记忆的的作业，即示教的内容也就非常复杂了，这时的存储器容量就要大，这是其缺点。

为了弥补上述方法的不足，可以采用高性能机械手的控制技术，它是利用计算机和显示装置等辅助设备可简单地给出已定轨迹的有关信息。此外轨迹跟踪的动作与把零件插入孔内的安装作业不同，虽然不需要高精度的力反馈控制，但却要求机械手的控制具有高速准确的动作。如果有可能还希望加速和减速是平稳的，不能因为不平稳而产生振动。因此，在轨迹控制中，如何使必要的运算能够快速进行是经常遇到的难题。

到目前为止已经提出了很多有关轨迹的控制方法，这些方法与机械手的结构和执行机构的结构有关。下面简单地介绍轨迹控制的概要。

图2-17是进行轨迹控制时的必要运算方法。一般表示作业空间多数是选择三维直角坐标。当然，由于作业的种类不同，有时用极坐标或圆柱坐标反而更为方便。在此为易于理解选作业空间为直角坐标系。

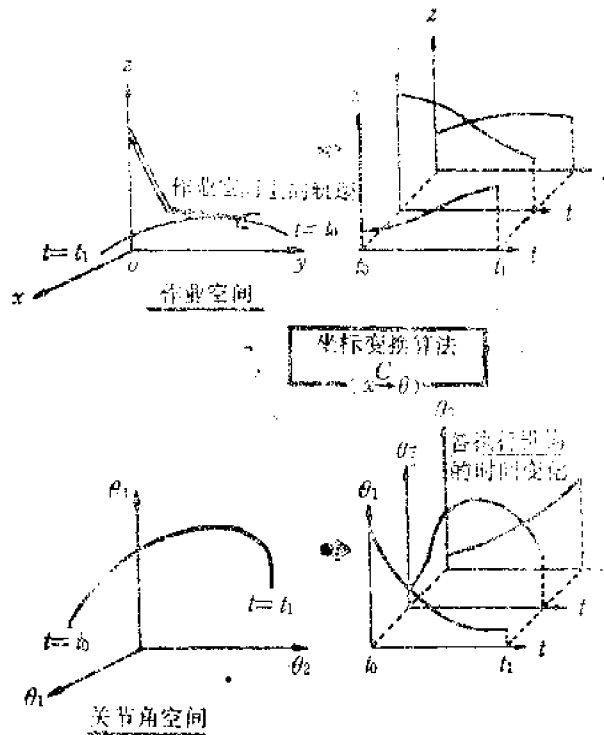


图2-17 轨迹控制的算法

为了使刚体在三维空间内固定,必须给定表示位置的3个变量 (x, y, z) 和表示3个方向的变量,即欧拉角 (θ, ω, ψ) 等6个变量。在进行喷涂等作业时,位置与方向是非常重要的,但在搬运作业时,方向只是在抓放物体时是重要的,在搬运途中只考虑位置就可以了。为了方便起见,在此把方向的3个变量省去。对机械手进行轨迹控制时,首先是在作业空间内给出轨迹。给出机械手通过轨迹上各点的时间,因此表示轨迹上各点的向量 x 是时间 t 的函数

$$x = x(t) \quad (2-6)$$

其次是坐标变换的算法,一般是必须解包括反三角函数在内的非线性联立方程组。当机械手的关节角给定时,按德纳维特-哈尔滕贝格(Denavit-Hartenberg)的坐标变换矩阵依次进行坐标变换可求得手部的位置。这时,如以关节角为未知数则可求得位置的关系式,可把此关系式称为方程式。如关节角给定,则位置也就唯一地确定了,反之如给定位置时,关节角也就单值地确定了。取由 x 到 θ 的变换为 C ,则

$$\theta(t) = C(x(t)) \quad (2-7)$$

用上式可求得各关节在时刻 t 的角度。

目前实用的机器人和实验用的多关节形机械手的执行机构,多数是用液压驱动或电动伺服马达。采用电动马达时,是通过加入马达的电流信号来控制各关节的力矩,叫做力矩指令型。另外采用液压驱动时,在执行机构上装有伺服回路,对各关节加入位置的输入信号,把它叫做位置指令型。

究竟位置指令型机械手好,还是力矩指令型机械手好,一般可概略地说明如下。对力矩指令型来说,如果进行各关节的角度和角速度反馈时,这时不仅实现了机械手的位

置控制，还可精确地进行速度和加速度控制，即实现了动力动作的控制。另外，位置指令型，是与力矩指令型各关节加位置反馈一样的，所以位置控制容易作，可以作到相当精确的定位。

如上所述，两者在原理上及性能上都是不同的，所以在进行机械手的轨迹控制时，根据执行机构的种类决定用位置指令还是力矩指令。由公式(2-7)可知，指令不同，使关节运动的方法也不同。

另外在力矩指令型时，必须预先知道机械手的关节角与力矩的关系，即机械手的运动特性。一般此特性可用下面的微分方程式表示

$$H(\theta)\ddot{\theta} + h(\theta, \dot{\theta}) = T \quad (2-8)$$

式中 $T = (T_1, T_2, \dots, T_n)^T$ 是各关节的驱动力矩向量， $\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)^T$ 是表示各关节角的向量， $H(\theta)$ ， $h(\theta, \dot{\theta})$ 分别是 $n \times n$ 矩阵， n 维向量。

由公式(2-7) 求出 $\dot{\theta}$ 、 $\ddot{\theta}$ ，将其代入公式(2-8)中就可求出公式右面的力矩 T 。由此可知，力矩指令型与位置指令型相比其计算工作量较大。

§ 2-4 自适应控制的应用

在进行多关节形机械手控制时，存在的问题是系统内的固有非线性、各关节间的相互干扰效果和由于姿势变化或被操作对象的重量变化所引起的特性变化等。在这种情况下，一般的线性控制理论就不适用了，如仍用线性近似的方法往往得不到良好的控制效果。美国加州大学的杜鲍夫斯基等人进行了把参考模型自适应控制理论用于多关节形机械手控制的尝试。

一 参考模型自适应控制

自适应控制系统是自动地把信号或程序的动特性检测出来，并依此自动设计控制系统的一种系统。虽然自适应控制的方法很多，但是到目前为止，只有参考模型式自适应是研究最多的，也是一种非常有效的方法。

图2-18是参考模型自适应控制系统的一般原理图。如果把机械手控制系统中带可变增益的系统叫做可变系统时，则对可变系统与模型都加入同一的输入，而根据两者的输出之差值得到的可变增益可按输出误差为零进行调节。关于调节此可变增益的方法也有很多研究成果。

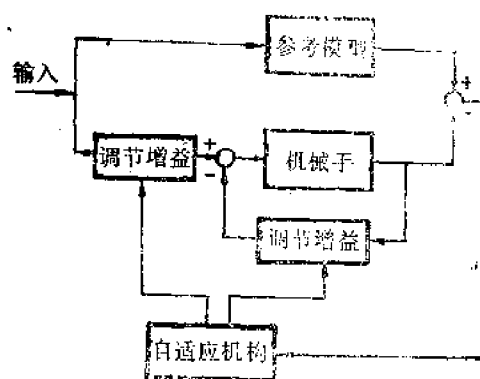


图2-18 参考模型自适应控制系统

二 机械手的动力学模型

图2-19是有6个自由度的多关节形机械手外观图。图2-20是此机械手的各关节角与各部尺寸简图。

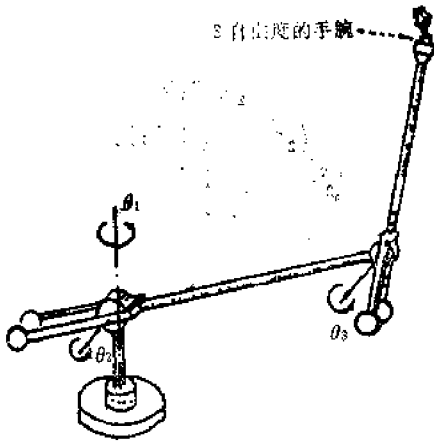


图2-19 6自由度机械手

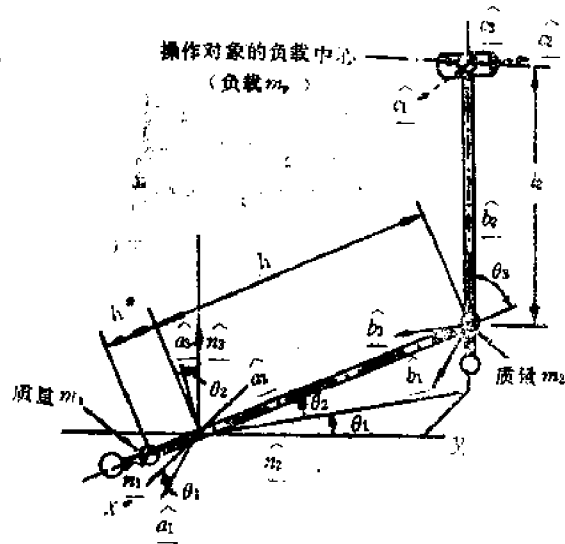


图2-20 机械手的坐标系

此机械手关节角的运动可由下面的拉格朗日运动方程式导出。

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}_i} - \frac{\partial T}{\partial \theta_i} + \frac{\partial V}{\partial \theta_i} = q_i, \quad (i = 1, 2, \dots, 6) \quad (2-9)$$

式中 T 、 V 分别是机械手的动能与位能； q_i 是广义力。

T 可用下式表示。

$$T = \frac{1}{2} m_1 (\dot{R}_1 \dot{R}_1) + \frac{1}{2} m_2 (\dot{R}_2 \dot{R}_2) + \frac{1}{2} m_3 (\dot{R}_3 \dot{R}_3) + \frac{1}{2} \omega_1^T I^1 \omega_1 + \frac{1}{2} \omega_2^T I^2 \omega_2 + \frac{1}{2} \omega_3^T I^3 \omega_3 \quad (2-10)$$

式中 R_1 、 R_2 、 R_3 分别是上臂、前臂及手腕同负载结合在一起时重心的位置向量。 I^1 、 I^2 、 I^3 分别是上述各部分的惯性矩阵， ω_1 、 ω_2 、 ω_3 是角速度向量。此机械手的手部是紧紧地抓着对象物，可把手腕与物体看成是一个整体。由于手腕与物体间的距离很小，所以 I^3 可忽略不计，关节角只考虑 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 也就可以了。 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 是一般坐标上的角度，所以 \dot{R}_1 、 \dot{R}_2 、 \dot{R}_3 可按下式求得：

$$\begin{aligned} \dot{R}_1 &= \dot{\theta}_1 l_1^* \cos \theta_2 \hat{\alpha}_1 - \dot{\theta}_2 l_1^* \hat{\alpha}_3, \quad \dot{R}_2 = l_1 (-\dot{\theta}_1 \cos \theta_2 \hat{\alpha}_1 + \dot{\theta}_2 \hat{\alpha}_3) \\ \dot{R}_3 &= -\dot{\theta}_1 (l_1 \cos \theta_2 + l_2 \cos(\theta_2 + \theta_3)) \hat{\alpha}_1 - (l_2 (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) \sin \theta_3) \hat{\alpha}_2 + \\ &\quad (l_1 \dot{\theta}_2 + l_2 (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) \cos \theta_3) \hat{\alpha}_3 \end{aligned} \quad (2-11)$$

将公式 (2-10)、(2-11) 代入公式 (2-9) 可得到描述机械手运动的公式:

$$\mathbf{M} \ddot{\theta} + \mathbf{G} \dot{\theta} = \mathbf{Q} \quad (2-12)$$

式中 \mathbf{M} 是以广义坐标的非线性函数 m_{ij} 为元素的 3×3 对称矩阵; \mathbf{G} 是以广义坐标的非线性函数 g_{ij} 为元素的 3×3 矩阵; \mathbf{Q} 是以 Q_i 为分量的三维向量, 而 Q_i 则是由 \mathbf{T} 、 \mathbf{V} 的微分与广义力 q_i 组成的。如将各分量的一个为例写出其式如下。

$$m_{12} = m_{21} = l_{13}^2 \sin \theta_2 + l_{23}^2 \cos \theta_2 + l_{13}^2 \sin(\theta_2 + \theta_3) + l_{23}^2 \cos(\theta_2 + \theta_3) \quad (2-13)$$

$$g_{12} = \{-2(m_1 l_{11}^2 + m_2 l_{11}^2) \sin \theta_2 \cos \theta_2 - 2m_2 (l_{11} \cos \theta_2 + l_{21} \cos(\theta_2 + \theta_3)) (l_{11} \sin \theta_2 + l_{21} \sin(\theta_2 + \theta_3)) + 2(l_{11}^2 - l_{21}^2) \sin \theta_2 \cos \theta_2 - 2l_{12}^2 (\sin^2 \theta_2 - \cos^2 \theta_2) + 2(l_{11}^2 - l_{22}^2) \sin(\theta_2 + \theta_3) \cos(\theta_2 + \theta_3) - 2l_{12}^2 (\sin^2(\theta_2 + \theta_3) - \cos^2(\theta_2 + \theta_3))\} \dot{\theta}_1 \quad (2-14)$$

$$Q_1 = T_1(t) - (l_{12}^2 \cos \theta_2 - l_{23}^2 \sin \theta_2) \dot{\theta}_2^2 - (l_{13}^2 \cos(\theta_2 + \theta_3) - l_{23}^2 \sin(\theta_2 + \theta_3)) (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3)^2 \quad (2-15)$$

式中 $T_1(t)$ 是加在第 1 关节上的输入力矩。由于篇幅的限制不能把所有的系数都一一写出来, 但由上面可以看出, 多关节式机械手的动特性具有非线性, 而且是十分复杂的。

三 自适应控制系统的组成

调节机械手的反馈增益使闭环系统的特性与参考模型特性一致, 组成自适应控制系统。利用参考模型自适应控制的优点是, 即使在动特性与时间和姿势有关的系统中, 在给定的输入信号下也能在较宽的频带内得到稳定的响应, 即使对象物的质量辨识不准确也能适用。作为参考模型虽然可依设计者希望的参数来确定, 但是也可选择简单的线性非干扰系统。作为模型可用下面的 2 阶线性常系数微分方程来表示。

$$a_i \ddot{y}_i + b_i \dot{y}_i + y_i = r_i(t), \quad (i=1, 2, 3) \quad (2-16)$$

式中 $a_i = 1/\omega_{ni}^2$, $b_i = 2\zeta_i/\omega_{ni}$, ω_{ni} 是固有频率, ζ_i 是阻尼比。

对机械手, 如忽略各自由度间的干扰项, 则其非线性动特性可用如下方程式表示:

$$\ddot{\theta}_i = e_i K_m(i) / M(i) \quad (2-17)$$

式中 $K_m(i)$ 是马达的力矩常数, $M(i)$ 是第 i 关节的可变等价质量。如图 2-21 所示, 通过位置与速度反馈其特征方程式如下:

$$\frac{M(i)}{K_m(i)K_v(i)} \ddot{\theta}_i + \frac{K_v(i)}{K_p(i)} \dot{\theta}_i + \theta_i = r_i(t) \quad (2-18)$$

此式可改写如下:

$$\alpha_i(t) \ddot{\theta}_i + \beta_i(t) \dot{\theta}_i + \theta_i = r_i(t) \quad (2-19)$$

机械手可通过可调增益为 $K_p(i)$ 与 $K_v(i)$ 的简单位置与速度反馈进行控制。如把它与公式 (2-12) 进行比较后可知它是相当近似的动特性, 但是作为参考模型的算法研究

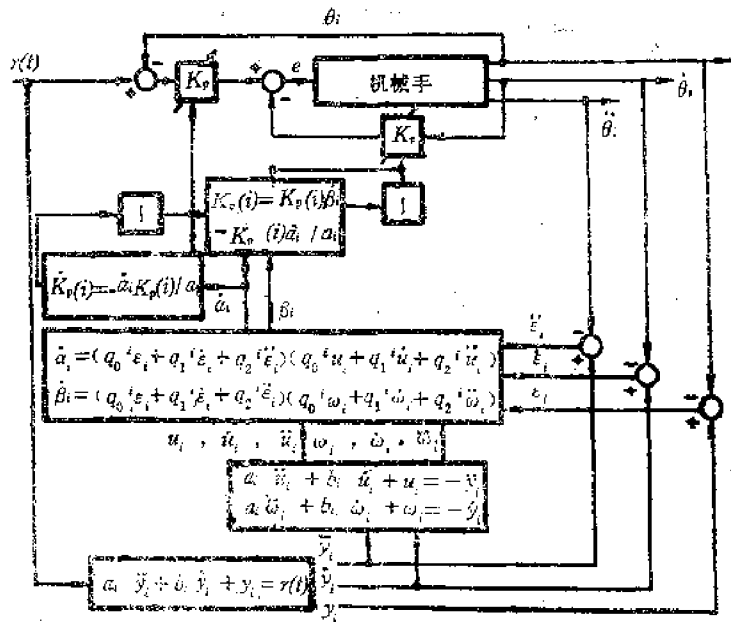


图2-21 自适应控制系统

这已经足够了，此外也不需要知道 $K_p(i)$ 、 $M(i)$ 的具体信息。但是这是假定这些参数的变化与机械手和自适应系统的响应时间相比是相当慢的。

二阶形的误差函数是按下式定义的：

$$f_i(e_i) = \frac{1}{2}(q_0^i e_i + q_1^i \dot{e}_i + q_2^i \ddot{e}_i)^2, \quad (i=1,2,3) \quad (2-20)$$

式中 $e_i = y_i - \theta_i$ ，权函数 q_i 是按能得到良好而稳定的响应而决定。如使用最大倾斜法，使 a_i 与 b_i 满足下式的关系来调节 $K_p(i)$ 与 $K_f(i)$ 时，则各自由度的误差函数 f_i 为最小。

$$\left. \begin{aligned} \dot{\alpha}_i &= -\partial f_i(e_i)/\partial a_i \approx \partial f_i(e_i)/\partial u_i \\ \dot{\beta}_i &= -\partial f_i(e_i)/\partial b_i \approx \partial f_i(e_i)/\partial w_i \end{aligned} \right\} \quad (2-21)$$

将式(2-16)、(2-19)、(2-20)代入式(2-21)，并令 $\partial y_i/\partial a_i = u_i$ ， $\partial y_i/\partial b_i = w_i$ ，将上式改写如下：

$$\dot{\alpha}_i = (q_0^i e_i + q_1^i \dot{e}_i + q_2^i \ddot{e}_i)(q_0^i u_i + q_1^i \dot{u}_i + q_2^i \ddot{u}_i) \quad (2-22)$$

$$\dot{\beta}_i = (q_0^i e_i + q_1^i \dot{e}_i + q_2^i \ddot{e}_i)(q_0^i w_i + q_1^i \dot{w}_i + q_2^i \ddot{w}_i) \quad (2-23)$$

式中 u_i 、 w_i 可由下述 2 式求得，此 2 式是以 a_i 、 b_i 对式(2-16)求偏导数求出的。

$$a_i \dot{u}_i + b_i \dot{u}_i + u_i = -\ddot{y}_i \quad (2-24)$$

$$a_i \dot{w}_i + b_i \dot{w}_i + w_i = -\dot{y}_i \quad (2-25)$$

$\dot{\alpha}_i$ 、 $\dot{\beta}_i$ 的值由式(2-22)、(2-23)决定，然后再把 $\alpha_i(t)$ 与 $\beta_i(t)$ 的定义式微分并与式(2-18)进行比较而求出可调增益 K_p 、 K_f 的速度。这里值得注意的是与自适应

机构的速度相比， M_i 的变化是相当缓慢的，而且 α_i 是近似于 a_i 的。综上所述，增益的调节速度可按下式来确定。

$$\dot{K}_p(i) = -\frac{\dot{a}_i K_p(i)}{a_i} \quad (2-26)$$

$$\dot{K}_v(i) = K_p(i) \dot{\beta}_i - \frac{\dot{a}_i K_v(i)}{a_i} \quad (2-27)$$

由式(2-22)到式(2-27)给出了使机械手闭环系统与模型的输出误差为最小的

$$\omega_n = 10.0 \text{ rad/s}, \zeta = 0.707$$

$$q_0^i = 0.707, q_1^i = 0.202, q_2^i = 0.00, (i = 1, 2, 3)$$

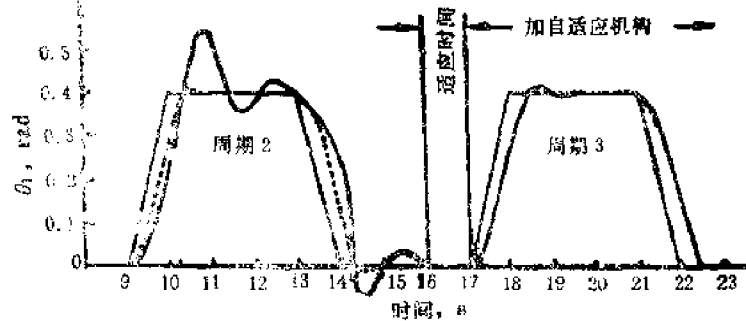


图2-23 自适应控制系统的响应

在组成自适应控制系统时，不需要知道对象物的负载情况，一旦开始作业，就可立即进入自适应控制。在图2-23中以周期3之前的自适应时间给位置输入指令加入一微小的正弦波自适应输入信号，按此信号调节自适应增益。自适应机构消除了由于参数变化而引起的波动，使全系统保持良好的动作，自适应信号对系统的影响是很小的。

§ 2-5 假手的学习控制

利用肌肉电气效应控制假手的研究已有些人进行了，美国的沙利迪斯等人用姿态自动装置的分段法研究了假手的控制。

能够使患者在肉体上和心理上满意的假手应该是看上去与人的外观形式相似，能够无意识地使它动作，为此就必须具备决定意识与学习的机能。假手多半是使用同多关节形机械手相似的连杆机构组成的，如上所述，由于它的动特性较复杂，为了实现平稳的动作必须进行消除干扰控制的计算。此机构的必要条件是：① 可实现性，② 外观上的美感(其中也包括动作)，③ 短的处理时间与小的存储容量，④ 学习能力，⑤ 与患者对话，⑥ 对各种动作的准确性，⑦ 对不同患者与环境的适应性，⑧ 用于其它系统等。

图2-24是用直流伺服电机驱动的7自由度假手，图2-25是阶段控制系统的方块图。这种机构的特点是把决定意识分成阶段的各个分级。下面依次加以说明。

一 控制级

在这里只考虑假手手腕的控制，即只控制 $\theta_1 \sim \theta_4$ 。把控制过程分别分解成为有一个自由度的4个局部过程。第1个子过程表示如下：

$$\dot{x}_i = \mathbf{A}x_i + \mathbf{B}(u_{Li} + \eta_i) \quad (2-28)$$

$$z_i = x_i + v_i \quad (2-29)$$

$$u_{Li} = f_i + u_i, (i = 1, 2, 3, 4) \quad (2-30)$$

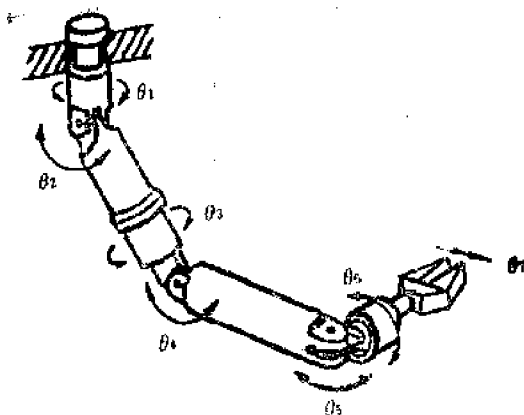


图2-24 7自由度的假手

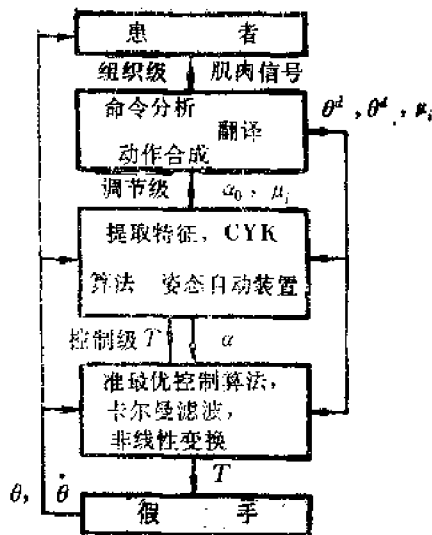


图2-25 阶段控制系统

$$x_i = \begin{pmatrix} \theta_i \\ \dot{\theta}_i \end{pmatrix}, \quad A = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

式中 z_i 是第 i 个子过程的输出; η_i, ν_i 是分散 ψ_i, ξ_i 的非相关零平均白噪声; u_i 是马达的输入力矩; 函数 f_i 表示重力和阻力矩以及哥氏力引起的与其它子过程的干扰效果。对系统动特性的目标函数 $J(\alpha)$ 定义如下:

$$J(\alpha) = \sum_{i=1}^4 \mu_i \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} E \int_0^T [(z_i(t) - x_i^d(\tau))^T Q_i(\alpha_i) (z_i(t) - x_i^d(\tau)) + u_{L_i}^2(t)] dt \quad (2-31)$$

$x_i^d(\tau)$ 是希望的最终值, μ_i 是常数, $Q_i(\alpha_i)$ 是临界阻尼响应, 按下式选取:

$$Q_i(\alpha_i) = \begin{pmatrix} \alpha_i^2 & 0 \\ 0 & 2\alpha_i \end{pmatrix} \quad (2-32)$$

此 α_i 由调节级确定。

作为控制规律, 采用有如下调节增益的结构:

$$u_i = L_i (z_i - x_i^d) + N_i f_i(z_i) = u_{L_i} + u_{N_i} \quad (2-33)$$

通过把自适应机构用于部分区间上, 以在线方式寻找可调增益 L_i, N_i , 使式 (2-31) 逐渐趋于最小。从而可通过学习过程连续地修改下面的子目标。

$$J(\alpha, k) = \sum_{i=1}^4 \mu_i \frac{1}{\tau_k} \int_{t_{k-1}}^{t_k} [(z_i(t) - x_i^d(\tau))^T Q_i(\alpha_i) (z_i(t) - x_i^d(\tau)) + u_{L_i}^2(t)] dt \quad (2-34)$$

区间 $\tau_k = t_k - t_{k-1}$ 满足下述条件:

$$\tau_{k-1} \leq \tau_k(V_k), \quad \lim_{k \rightarrow \infty} \tau_k = \infty \quad (2-35)$$

式(2-33)的第1项是对子过程的最佳控制规律,第2项是子过程间的相互作用以及由重力引起的非线性项的补偿输入,若 $\mathbf{N} = -1$,则各子过程可以各自分离,进行独立的学习。第*i*个子过程控制系统的结构如图2-26所示。

二 调节级

对调节级求加权矩阵 $\mathbf{Q}_i(\alpha_i)$,改善整个系统的动特性。能源消耗是评价假手的重要指标,有如下的最小能源评价准则 $\mathbf{K}(\alpha)$ 。

$$\mathbf{K}(\alpha) = \sum_{i=1}^4 \mu_i \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} E \int_0^T |\dot{\theta}_i(t) \mathbf{T}_i(t)| dt \quad (2-36)$$

式中 $\mathbf{T}_i(t)$ 是第*i*关节马达的输入力矩。

调节的问题是对各种动作确定使 $\mathbf{K}(\alpha)$ 为最小的4维调节向量 $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4)^T$ 。当16维空间表示 $\theta \times \dot{\theta} \times \theta^2 \times \dot{\theta}^2$ 时,某点 $\phi \in S$ 是作为一种控制模式定义的。

调节问题的求解是把 S 按下述方法分割成 n 个区域。第 j 个区域 $C_j (j \leq n)$ 是 $\alpha^* = \alpha^{(j)}$ 的全控制模式的集合,叫第 j 个调节级。

$$\phi \in C_j \iff \alpha^* = \alpha^{(j)} \quad (2-37)$$

$$\mathbf{J}(\alpha^*) \triangleq \min_{\alpha^{(1)}, \alpha^{(2)}, \dots, \alpha^{(n)}} \mathbf{J}(\alpha^{(j)}) \quad (2-38)$$

表示控制模式的特征向量 Γ 是按式定义的。

$$\Gamma = (\beta_2, \beta_4, \beta_8)^T, \beta_i = (\lambda_i, \lambda_i^2), (i=2,3,4) \quad (2-39)$$

式中 λ_i 是把 θ_i 离散化为5个区间的数值。

调节级 C_j 是按曹姆斯基(Chomsky)标准型自由文法来描述。假定 $L(G_j)$ 是由 G_j 产生的语言,符号列 Γ 是 $L(G_j)$ 中的语句时,那么只在这时才是 $\Gamma \in C_j$ 。此外,为了便于消除与增加学习中产生的规律,在控制模式分析中采用CYK算法。控制模式分类的学习机构是由姿势自动器组成。修正各调节级调节向量元素的顺序,具有最大元素顺序的向量按给定的调节级进行选择。第 l 级以语句 G_l 认识时,分类为 C_l 。如果把第 k 回学习时的状态 q_i 中的第 l 自动器 A_l 的元素顺序用 $f_l(k)$ 来表示时,则 A_l 的姿态转移矩阵如下:

$$f_{l+1}(k) = f[q(k) = q_i, q(k+1) = q_j] \quad (2-40)$$

自动器分别以1/2的概率进行如下操作:

$$f_i(k+1) = \max_m \min_j [f_m(k), f_{m_i}(k)] \quad (2-41)$$

$$f_i(k+1) = \min_m \max_j [f_m(k), f_{m_i}(k)] \quad (2-42)$$

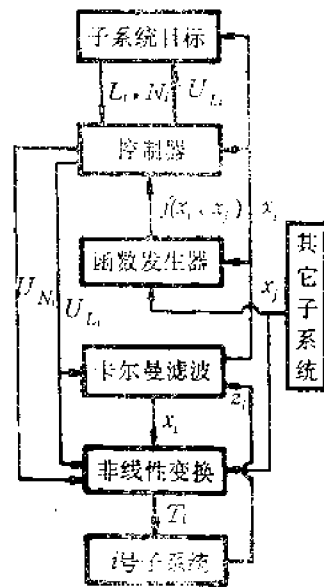


图2-26 控制器的结构

式中 $f_{n,j}(k) = f_{j,j}(k-1), \forall n \neq j$ (2-43)

$$f_{j,j}(k) = e_j f_{j,j}(k-1) + (1 - e_j) \sigma_j(k) \quad (2-44)$$

$$0 < e_j < 1 \quad (2-45)$$

$$\sigma_j(k) = \frac{1 - R_j(k)}{\max_{i,k} R_j(k)} \quad (2-46)$$

$$R_j(k+1) = \frac{k-1}{k} R_j(k) + \frac{1}{k} \frac{1}{t_{k+1} - t_k} \int_{t_k}^{t_{k+1}} \sum_{i=1}^4 |\dot{\theta}_i T_i| dt \quad (2-47)$$

$$R_j(0) = 0 \quad (2-48)$$

图2-27是学习算法的原理图。

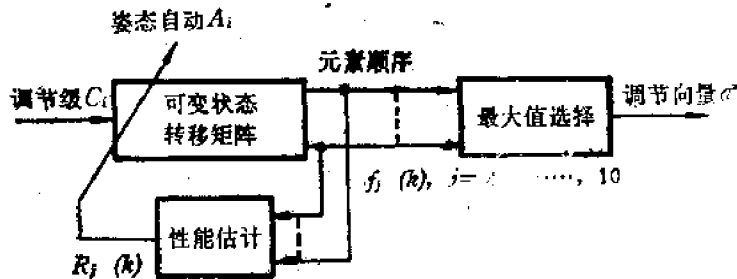


图2-27 学习算法原理图

三 组织级

如图2-28所示，组织级的接口机能是处理由患者向执行器的变量 $(\theta_1^i, \dots, \theta_n^i)$ 与 α_i 发出的一连串指令。由于患者随意肌的收缩而产生电信号，将它们进行脉宽调制之后进行2进制符号化处理。表2-5表示的是15个语言指令。指令是由这组语言中选择几个，把它们连接起来而组成的。基本的动作指令有以下三个：

表 2-5 指令语言

二进制符号	指令语言	终端符号
0001	1	T ₁
0010	2	T ₂
0011	3	T ₃
0100	4	T ₄
0101	5	T ₅
0110	6	T ₆
0111	7	T ₇
1000	8	T ₈
1001	go to	T ₉
1010	move joint	T ₁₀
1011	orient hand	T ₁₁
1100	Not	T ₁₂
1101	Very	T ₁₃
1110	Fast	T ₁₄
1111	Stop	T ₁₅

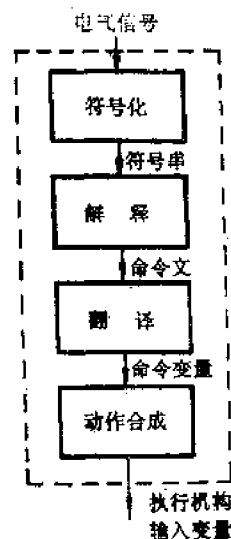


图2-28 组织级的结构

(go to) $(x^d)(y^d)(z^d)$;
 (move joint) $(i)(\theta_i^d)$;
 (orient hand) $(\theta_2^d)(\theta_3^d)$;

响应的速度有5种，它们分别是 $\alpha_0 = 1, 2, \dots, 5$ 。 α_0 是调节向量的系数，按符合人的动作进行选择。指令处理的第一阶段是检查一连串的指令是否合乎语法规则，与此同时把符号列最左边的部分取出来，可以认识的符号列具有唯一的解释意义，使其与指令变量的集合对应起来，这时变量 $x^d, y^d, z^d, \theta_2^d, \theta_3^d, \alpha_0$ 就确定了。这一操作是通过修正叠加自动器 $\Pi(\theta, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, r_0, z, F)$ 来实现。

§ 2-6 利用机械手进行装配作业中的问题

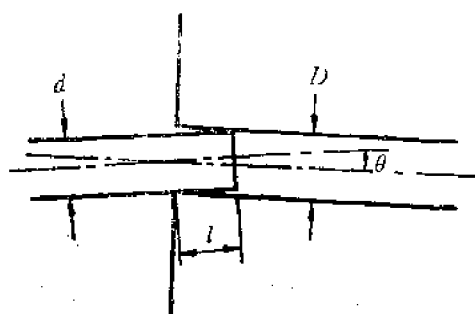
在用机械手进行装配作业时，由于其作业内容不同，其所需要的控制技术也不同。因此有必要按作业内容进行分类。比如，可以将作业内容按元件的尺寸和装配时的精确性进行分类。如果被装配的元件或机器总是以相同的尺寸向同一位置供给时，即使是非常精密的发动机也可采用开环控制进行装配。与此相反，如果使用大量的传感器并使用高性能的计算机时，即便工件供给是随机的也可进行装配。实际上，问题是在这两种极端情况的中间进行作业。

如上所述，作业的复杂程度是与其所必须达到的技术水平有关的。

一 作业内容的分类

表示作业复杂程度的方法是很多的，但从宏观上来看，应该有有关装配顺序的详细分析和必要的工具数等。从微观上来看，有工件间的装配间隙，装配时工件间产生的反作用力以及工件的移动路线等。作为装配的例子是家庭用洗衣机齿轮箱的装配工艺。此装配作业是由握住工具、定位以及工件旋转等17种单独作业组成，为了处理由6.4mm到33cm的34个零件，总共是由221个单独动作组成的。另外在完成此装配作业中需要36种工具。

具体可以装配作业为例，如图2-29所示。可按两个无因次数 C 与 l/D 来进行分类。 C 是定量地表示装配作业的难易程度， l/D 是以 C 为参变量的偏摆程度和圆棒的插入深度。



$$C = 1 - d/D$$

$$\frac{l}{D} = \frac{1 - \cos(1 - C)}{\sin \theta} = \frac{\theta^2/2 + 1 - \theta^2 C/2}{\theta}$$

图2-29 装配作业的几何关系

二 技术水平的分类

装配作业大致可分为搬运动作、保持动作和安装动作。与此相对应机械手的动作可

分成以下两种类型。一种是只把工件握紧、放开或使其移动的粗动作，这种动作简单的开环控制系统就可实现，目前工厂中使用的机械手多数是属于这一类型的。另外一种是在装配工件时动作准确，可以最大限度地利用工件间的接触和反作用力等信息，即所谓自适应型的动作。此外，装配作业还可按其使用信息的种类和数量进行分类。

0级是不利用任何外来的信息，只能进行简单且重复的动作，即所谓的录返型系统。即使是这样的系统，在间隙大且工件的尺寸精度与位置精度很高时，也可进行一定的高难度作业。这时，为了尽可能使装配工件间不发生咬合现象，应该在硬件上装有跟踪手部装置的机能。从此观点出发研究的方法之一就是后面介绍的RCC法。

1级是利用力或接触传感器信息的系统。由于把这些信息进行反馈，可以得到在软件上跟踪手部装置的机能。这种系统类似于盲人进行的动作，总是在触到之后才得到信息。因此，若不加入探索动作等多余的动作，则工件的位置或方向就必须是事先就已经知道的。

2级是附加视觉传感器或接触传感器等，它能够适应周围环境不清的情况。比如，可以由运动着的传送带上把工件取下来，或校正安装前的对准方向等作业。

1级以上的系统，进行力反馈的控制，其基本组成如图2-30所示。此控制方式可使反作用力或力矩为零。此外，可使某一坐标产生一定的力，而其它坐标的反作用力为零。因此，这种方式可以看成是装配作业或棱边精加工和表面法线方向的分度等控制方法的统一表现形式。

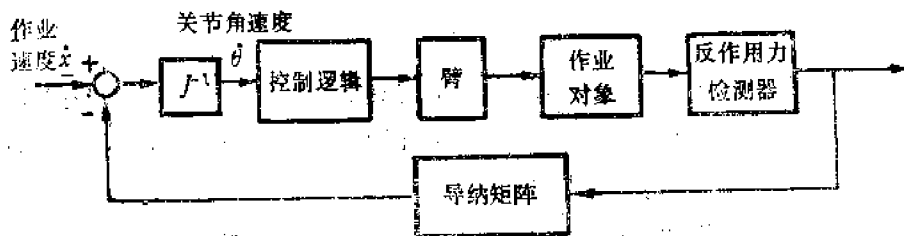


图2-30 控制系统的组成

§ 2-7 用机械手进行装配作业

随着机械手硬件与软件的进步，机械手开始代替人从事简单重复的作业及对人有害或危险环境的作业等。其中包括喷涂、焊接、锻压或热处理作业中的装料、取料，此外还有装配作业。在这些作业中，装配与其它作业相比是自动化发展较慢的一个领域。这是因为要实现有效的自动化装配作业，必须让机器有类似人的良好操作能力，这相当于要求机械手实现人工智能的机能。

目前人们主要对装配作业中的基本动作，即配合作业进行了研究，其成果的一部分已在现场使用了。但是让机械手进行几个工件的组装，有的部份还要用螺钉固紧等作业，真正完成一个部件的自动装配，这样的自动化作业还处于研究阶段。但是作为装配操作之一的插孔作业，已经达到了实用化的程度。下面介绍在手腕部装有柔性机构的

RCC法，装配作业时插入工件与孔的相互干扰分析，以及用模拟的方法证明在插孔动作控制中加入接触力反馈的有效性。

装配作业的问题是插入件正确地对准孔的位置，从而使两物体在不发生不必要接触的情况下完成插孔作业。若两物体为完全刚体时，则变为两物体的正确定位问题。确实，若是物体的形状和孔的位置形状都已知，而且它们是具有重复性的时候，可以进行准确的定位，所以也就不担心产生误差了。实际上各种零件并不具有同样大小的公差，而且夹具、工具、搬运工具及机器人等也是有误差的，所以要设法消除定位误差。

一 装配作业中的误差

定位误差可分为几何上的平移误差与角度误差。平移误差是轴与孔的两轴心线之间的距离，角度误差是两轴心线间的角度（图2-31）。

由于定位误差大小的不同，装配时将产生不同的结果。误差大时要产生切削现象，插入动作就无法进行。误差较小时插入作业也要产生较大的接触力，致使对象工件损伤，而且所需的力也比正常时为大。一般而言，销子与孔的位置关系有两种情况：① 两者的倒角部分处于对向的状态，② 两者的间隙处于允许范围之内完全可以插入的状态。非常明显，如无倒角，在前者的位置关系下是不能插进去的。因此，插入作业的第一步是通过控制倒角对向而使平移误差减小，但也并非如此就可插得进去。因为，要把销子插进去最终必须把平移误差吸收掉，这时就不能允许销子有一定的倾斜。因此，为了确实地把销子插进去，必须控制角度误差以使得在足够的深度以内销子与孔之间不会发生点接触（图2-32）。

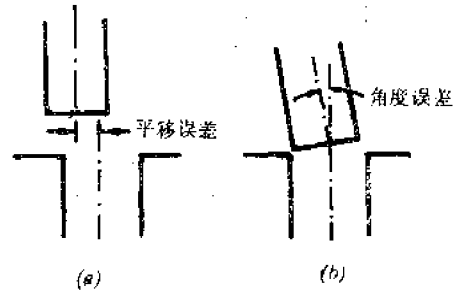


图2-31 平移误差与角度误差

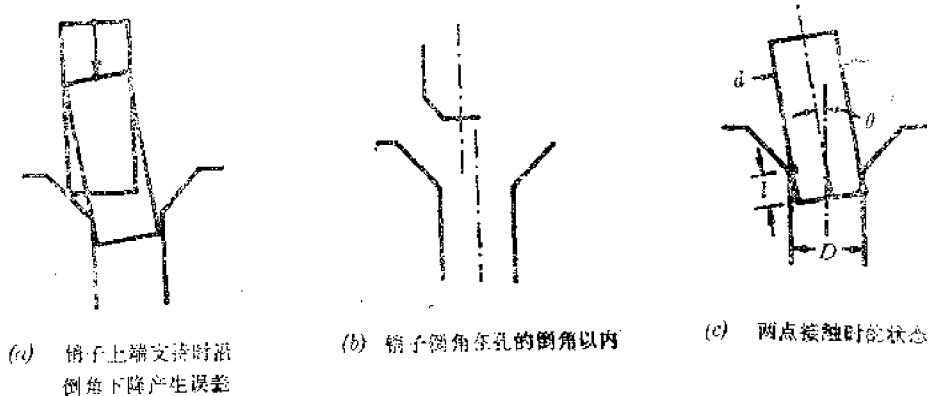


图2-32 插入时销子的状态

如取不发生两点接触的插入深度最小值为 l_{min} 时， l_{min} 必须满足式（2-49）。式中 μ 是摩擦系数， D 是孔径。随着销子与孔的间隙减小，角度误差的允许值也变小。插入深度 l_{min} 值可按式（2-50）计算：

$$l_{\min} > \mu D \quad (2-49)$$

$$\theta_{\max} = \frac{D-d}{l_{\min}} \quad (2-50)$$

$$= \frac{(D-d)/D}{\mu} \quad (2-51)$$

例如, $D = 0.5''$, $\mu = 0.2$, 而 $D - d = 0.0005''$ 时, $\theta_{\max} = 0.29^\circ$, 若 $D - d = 0.002''$ 时, $\theta_{\max} = 1.14^\circ$ 。

上述的角度误差是由初始位置给定时的角度误差, 手部移动时的误差, 或者是平移误差造成的。为了完全实现装配作业, 必须消除所有这些误差, 为此必须有效地控制下面的各种变量, 所以成本也就提高了。这些变量是工件的容许尺寸及尺寸精度、夹具的结构、固定工具及送料器的位置与姿势、工具摩擦的影响、热膨胀及工件形状的变化等。对机器人来说, 为了解决上述问题必须有完全的复现性, 但是考虑到齿轮也有磨损, 所以这是很难做到的, 就是考虑到机器人中产生故障时要更换零件, 这种要求也不切合实际。

二 装配作业的柔软性

但是, 并不是除了高精度化之外就无法解决定位误差了。其方法之一就是人们很早就已经知道的浮动法。例如, 让固定工具在某一范围内滑动而消除平移误差。但是这种方法不但不能吸收角度误差, 还不能自动返回到开始位置, 这是这种方法的缺点。因为浮动法使一些固定工具处于浮动状态, 所以对有些情况是不合适的, 而且其成本也高。另外还有隐蔽浮动法, 这是在装配时令工件与夹具, 工具稍微倾斜的方法。这时的倾斜量、力的大小一般是未知的, 因此这种方法也很不固定, 且重复也很困难, 所以工程上无法应用。

三 模糊对中的柔软性(RCC)

以上的问题可用RCC加以解决。RCC方法对各种夹具、送料器等误差的积累很有效, 所以一般可解决定位误差问题。它可以装配0.01mm左右的间隙, 这是它的特点。此外RCC的尺寸很小适合装在机械手的手部。

RCC的最大特点是可以单独地吸收平移误差和角度误差。如果接触力横向作用, 就产生平移运动。而且销轴通过孔的倒角可以插入孔内。即销轴的端部象是非常柔软的支承, 而且可自由地摆动。只要满足式(2-51)就可使倒角面一致而使平移误差得到了控制, 这样就能达到很好的定位。因此也可适当地选择倒角的大小。

另外, 用RCC支持销轴, 可以其下端部为中心进行旋转。在进行插入作业时, 根据销轴所受的接触力实现使销子轴与孔轴一致的修正动作。当开始插入时的角度在以式(2-51)求得的 θ_{\max} 以内时, 就可不受摩擦的影响而将销子插进去。

下面按图示情况说明RCC的动作。图2-33中表示的是构成旋转中心的模糊中心

(RC)。由图可知，RCC的一部分以 RC 为中心实现了旋转运动。图2-34是表示RCC的其它部位实现横向平移的情况。

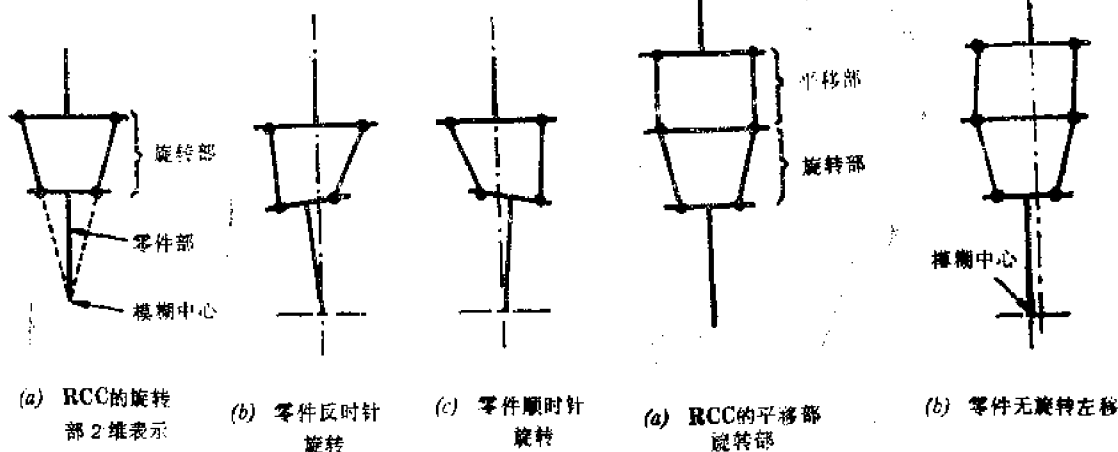


图2-33 RCC的旋转运动

图2-34 RCC的平移运动

在进行配合作业时，首先是前者动作之后进行位置的修正，然后实现插入动作时后者动作而修正角度误差。图2-35是其中的一种形式，它是为了研究此装配作业时使用的，而工业上实际使用的设计，其尺寸大小如表2-6所示。

表 2-6 研究用及工业用RCC

模型	由RCC的固定部到模糊中心的距离, mm	重量 kg	横向刚度 kg/cm	扭转刚度 kg·cm/mrad
1	127.0	0.136	17.85	1.386
4A	203.2	1.360	9.82	1.037
4B	177.8	0.362	8.75	0.518

[使用情况] 模型1: 在研究所使用两年 $mrad = \frac{rad}{1000}$
 模型4A, 3个用于工业实验与考核
 模型4B, 5个用于工业实验与考核

RCC的安装示意图如图2-36所示。这时，必须使销子的端部接近 RC（模糊中心）而夹住。但是不一定非使销子的端部正确地对准模糊中心。通过实验可知，即使由RCC到销子端部的距离有10~15%的轴向误差也不会降低插入作业的动作机能。

在设计RCC时必须注意下列条件：① 由于位置误差过大而使倒角部分对不上时，不能使用RCC；② 正在操作时RC的位置不能变化（但也有办法解决）。在沿水平轴实行插入作业时，必须采取平衡措施；③ 用RCC组件可能吸收误差大小的限制条件是保证RCC产生的应力应控制在弹性极限以内；④ 为使工件不引起切削和在接触点处不引起变形应满足公式（2-51）的条件。

如能限制在上述条件以内，进行小间隙作业时，RCC就成为位置误差吸收器了。能够吸收误差的大小，在标准情况下平移为1~2mm，角度为1~2°，因此就使得设计者在送料器装置的定位、棘爪的均匀性以及工件允许误差大小等限制条件的选择上有很大的灵活性。

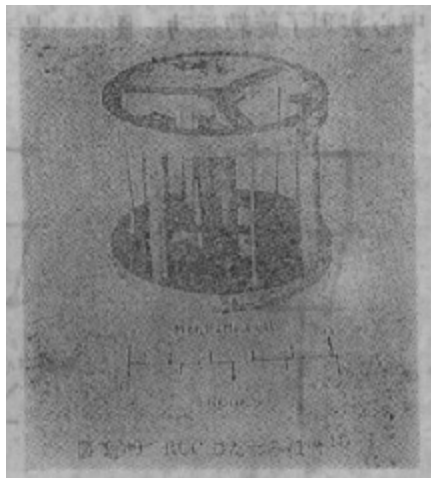


图2-35 RCC的柔性机构

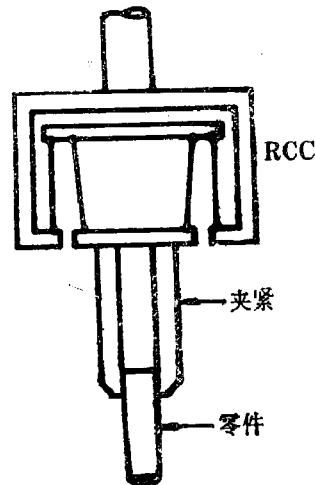


图2-36 手部的RCC装置

四 RCC的应用实例

1. 动配合(有间隙配合)

(1) 装入轴承 轴承在 2mm 的平移误差时也能装入 40mm 的孔内, 其间隙为 0.01mm。在平均误差中, 孔与夹具的允许误差为 1mm, 在自动化装配时其插入时间为 0.2s。

(2) 在花键轴上装配齿轮 利用RCC插入轴时的模仿动作进行装配。

(3) 插入铆钉 在插入孔的位置不正确, 孔的形状不定时RCC也是多半能用的。

(4) 扭紧螺钉 除了扭紧螺钉的力矩外, 与简单的销钉插孔作业是相同的。

(5) 箱体的盖子 与圆形断面相同, RCC也可进行长方形断面工件的装配作业。但是要控制插入“轴”周围的允许误差角以保证壳体与盖的倒角重叠。

(6) 小工件的精密安装 不仅定位误差小, 而且间隙也小。这样的工件是易于损坏的, 其表面也容易变形。由于使用RCC可防止切削现象和大的接触力的发生。

2. 静配合(过盈)

(1) 插入喷嘴 黄铜制的喷嘴直径为3mm, 长度为5mm。壳体是铝制件, 在过盈量为0.02mm时, 孔的位置有0.5mm左右的误差, 如果喷嘴的刚度很大时, 两者要受到破坏。

(2) 向层状工件内插入轴 本质是与销轴插入孔内是一样的。这时应保证各层不能脱开, 关于这个问题RCC是解决不了的。

(3) 丝锥插孔 与螺钉插入切好螺纹的孔是一样的。

3. 工具的交换

(1) 将工具插入工具交换装置或插入工具保持座 与动配合是一样的, 但是把工件装入之后为了使工具能正常发挥作业机能, RCC必须是紧紧固定的。

(2) 钻头插入钻杆卡套 因为 RCC 的机能是以很小的接触力将钻头插入钻杆卡套, 所以使套的摩擦大为减少, 即使钻头的定位精度差些, 也可高精度地插入钻杆卡套。

(3) 力反馈时的应用 利用力反馈进行装配作业时,必须检测作用力。若是对象物的位置不准确,或力传感器的位置分辨率很低,力要超过传感器的量程,其输出值就无任何意义了,特别是测量小的力或传感器的灵敏度高时,更容易引起上述情况。通过使用RCC,由于其多轴的缓冲作用,是以小的力产生大的变形,可使作用在传感器上的力变小。

§ 2-8 机械手的力控制

现在工厂用的工业机器人,其中大多数是以控制手部位置为主的位置控制,基本上都是点到点(PTP),连续(CP)等控制方法驱动机械手。这些机械手是用作搬运工件或定位,涂装或焊接作业等。然而更高级的作业,如进行配合或扭紧螺钉等装配作业时,这种机械手就不适用。进行这样的作业时,不只是位置,此外还要引入力或力矩控制的概念。

力控制(或力矩控制)的方法之一是在手部或各关节处装有检测变形效果的力传感器,根据检测出来力的信息而进行反馈的方法。另外还有在驱动部装有可调力矩的执行机构而直接进行力控制的方法。

对前一种方法已有各种成果发表,如日本日立公司的后藤等人用柔性的机构与力传感器进行了直径72mm,间隙为 $3\sim 10\mu\text{m}$ 的圆棒插孔实验。随后他们又提出了两种插孔控制法,一种是利用反馈的直线探索法,另一种是二维多级探索插入法。用上述方法,不使用计算机而只用简单的程序控制器进行了电马达的装配作业。

此外还有沃科布拉特维克(Vukobratovic)等人发表的在6自由度拟人机械手的手部加有力传感器,进行自适应控制插孔作业的实例。此外还有很多研究成果,这些方法都是着重于对软件控制结构进行研究的。

后者的力控制使用所谓前馈的机械手,重视硬件本身的开发,到目前为止已发表了很多独特的构想,这些方法的先驱就是在§ 2-2中的“有力矩控制机能的机械手”。

一 位置和力的混合控制

使用手部传感器的力控制实例有美国的拉依贝特等人开发的能同时满足位置与力约束条件的混合控制。

在环境发生变化而且对它的认识又不充分时,机械手不能进行正确的控制,因而不能进行实际有效的作业。这里,作为了解机械手与环境间状态的方法而使用手部力传感器时,较之于只按位置信息进行控制是更有效的。但是近年来在这个领域内并没有什么太大的进步,其问题之一是很好地利用这种信息而建立合适的控制系统和计算方法尚且没有解决。

二 约束条件与坐标系

图2-37是曲柄旋转与扭紧螺钉的作业例,图的右侧是各作业时的自然约束条件与力

了实现作业而人为加入的作业约束条件。

关于某一特定作业的自然约束条件，一般化的表面是以 N 自由度的约束空间定义的，沿此表面的法线方向约束位置（此处位置是指三维空间内的位置与方向），沿切线方向是约束力。而作业约束条件是令机械手进行作业时，为了确定目标位置与力的轨迹时定义性质的条件，它与自然约束条件相反，力是在表面的法线方向，而位置是在切线方向受约束的。

值得注意的是，约束条件或轨迹定义的坐标系不是机械手的关节角坐标($\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)^T$)，也不是手部和传感器部的固定坐标系。对每个作业将适当定义的 N 自由度的直角坐标系用 $\{C\}$ 表示是比较方便的，把它们分别叫做广义坐标或约束坐标。

在进行某一装配作业时，选择什么样的约束条件是个非常重要的研究课题，在此认为这种选择已定才进行下面的讨论的。

三 混合控制器

下式是由广义坐标 $\{C\}$ 到关节角坐标的变换。

$$\theta_i = \Omega_i(x_1, x_2, \dots, x_N) \quad (2-52)$$

式中 θ_i 是机械手第 i 关节的角度， Ω_i 是变换函数， x_j 是 $\{C\}$ 的第 j 个元素。

对混合控制器来说，因为向每个关节加的驱动信号是同时满足位置与力的约束条件，在 $\{C\}$ 中选出控制位置与控制力的元素 N 个，用它们组成驱动信号。其表达式如下：

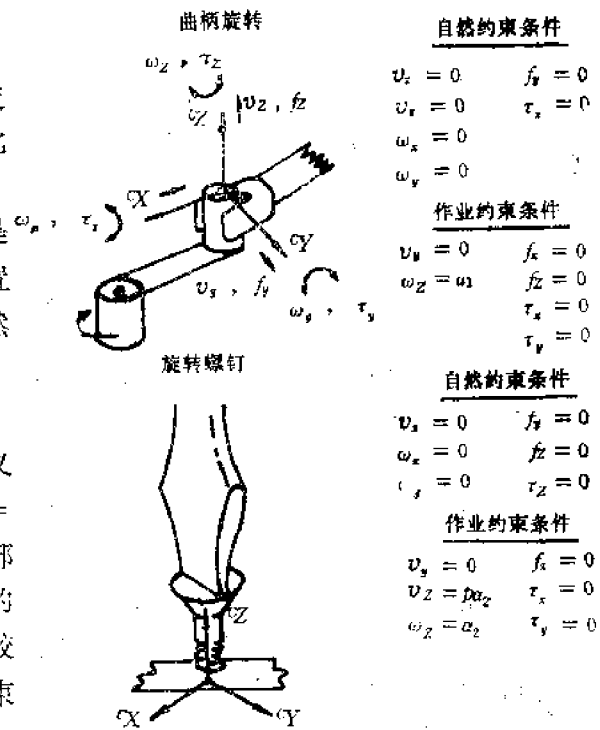
$$\tau_i = \sum_{j=1}^N \{ \Gamma_{ij} [S_j \Delta f_j] + \psi_{ij} [(1-S_j) \Delta x_j] \} \quad (2-53)$$

式中 τ_i 是第 i 关节的驱动力矩， Δf_j 是 $\{C\}$ 的第 j 个自由度的力误差， Δx_j 是 $\{C\}$ 的第 j 个自由度的位置误差， Γ_{ij}, ψ_{ij} 是对第 j 个输入进行第 i 个输出时的修正函数， S_j 是柔性选择向量的元素。柔性选择向量 S 是2进制向量，比如可用下式表示：

$$S = [0, 0, 1, 0, 1, 1]^T$$

同样，柔性选择矩阵 $[\varphi]$ 由下式定义：

$$[\varphi] = \begin{vmatrix} S_1 & & 0 \\ & S_2 & \\ 0 & & \dots \\ & & & S_N \end{vmatrix}$$



(v : 速度, ω : 角速度, f : 力, τ : 力矩)

图2-37 作业例

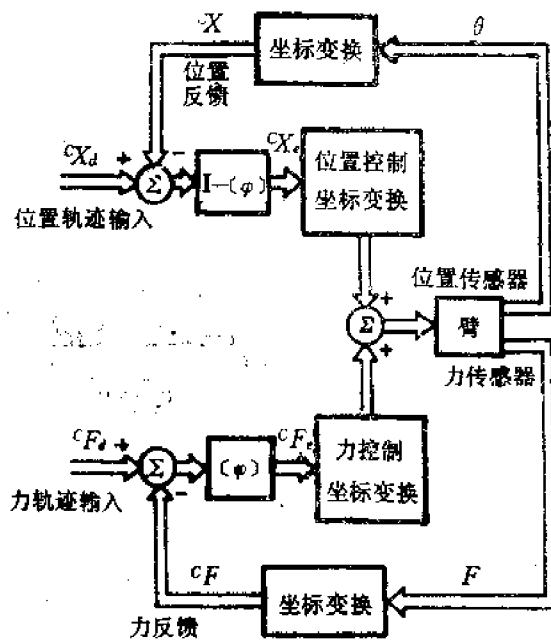


图2-38 混合控制系统

图2-38是混合控制的结构图。由于此处位置及力传感器的输出，是对于关节坐标及力传感器上的固定坐标{H}求出的，所以必须分别按下式变成{C}坐标。

$${}^c X = A(\theta) \quad (2-54)$$

$${}^c F = [{}^H T]^H F \quad (2-55)$$

式中X是机械手的手部位置，A是由{θ}向{C}的变换函数，^HF是加在手部的力，

$$[{}^c T] = \begin{bmatrix} [{}^c R] & : & 0 \\ \dots & \dots & \dots \\ [V \times] [{}^c R] & : & [{}^c R] \end{bmatrix}$$

由[^cR] = {H}向{C}变换的矩阵，[V ×] =
$$\begin{bmatrix} 0 & -V_z & V_y \\ V_z & 0 & -V_x \\ -V_y & V_x & 0 \end{bmatrix}$$

V是在{C}中由{C}的原点向{H}原点的向量。

由上可知，位置误差ΔX(t)与力误差ΔF(t)分别由下式表示：

$$\Delta X(t) = {}^c X_d(t) - A(\theta(t)) = {}^c X_d(t) - {}^c X(t) \quad (2-56)$$

$$\Delta F(t) = {}^c F_d(t) - [{}^c T]^H F(t) = {}^c F_d(t) - {}^c F(t) \quad (2-57)$$

实际上在控制机械手时，除了这些误差信号之外，还要附加表示惯性力、重力、机械手内部的摩擦力及哥氏力等对机械手动特性引起的非线性项的前馈环节。

四 2 自由度机械手的控制

图2-39是2自由度机械手与手腕传感器图。图2-40为2自由度机械手的作业例。

控制方法是如图2-40所示的数控x-y工作台在^cX方向上加力控制，在^cY方向上加

位置控制。因此 $S = [1, 0]^T$ 。

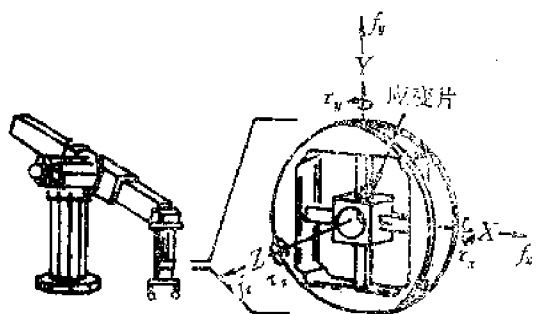


图2-39 手腕传感器

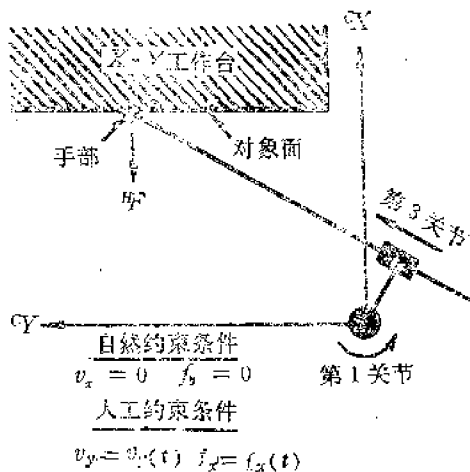


图2-40 2自由度机械手作业图

进行力检测的手部运动依图2-41得出如下的模型：

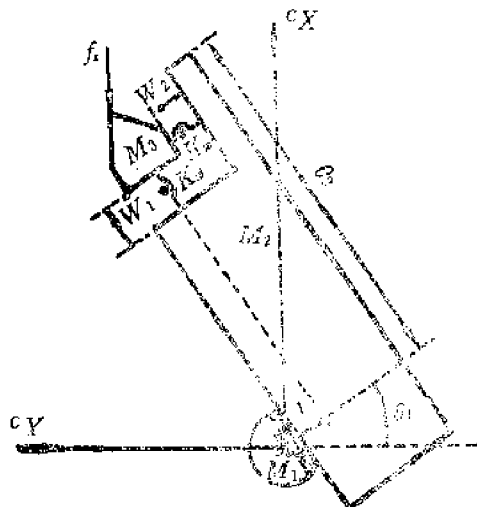


图2-41 2自由度机械手的模型

$$\ddot{\theta}_1 = \frac{1}{I_1(\theta_2)} [\tau_1 + B(\dot{\theta}_1) + \theta_2 K_p W_2 + K_w W_1] \quad (2-58)$$

$$\ddot{\theta}_2 = \frac{1}{M_2 + M_3} [\tau_2 + B_2(\dot{\theta}_2) + K_w W_1] \quad (2-59)$$

$$\ddot{W}_1 = \frac{1}{M_3} [-K_w W_1 - f_x \cos(\theta_1)] \quad (2-60)$$

$$\ddot{W}_2 = \frac{1}{M_3} [-K_w W_2 + f_x \sin(\theta_1)] \quad (2-61)$$

$$f_x = K_r (C_x - C_{x,r}) \quad (2-62)$$

$$C_x = \theta_2 \cos(\theta_1) + l \sin(\theta_1) \quad (2-63)$$

$$B_i(\dot{\theta}_i) = \begin{cases} -\text{sgn}(\dot{\theta}_i)[\min(\tau_{c,i}, |\tau_i|)], & (\dot{\theta}_i \approx 0) \\ -\text{sgn}(\dot{\theta}_i)[\tau_{c,i}], & (\dot{\theta}_i \text{ 为上述值以外时}) \end{cases} \quad (2-64)$$

式中 C_x 是对象面的位置, K_w 是手腕传感器的弹簧刚度, K_r 是对象面的弹簧刚度, M_i 是机械手的各部分质量, l 是连杆的变形, $I_1(\theta_2)$ 是绕关节1处的转动惯量, τ_c 是静摩擦, τ_s 是库伦摩擦。

用公式(2-54)~(2-57), 可求得{C}坐标系内的位置及力的误差如下:

$$\Delta X(t) = {}^c X_d(t) - A(\theta(t)) \quad (2-65)$$

$$\Delta \dot{X}(t) = {}^c \dot{X}_d(t) - [J]\dot{\theta}(t) \quad (2-66)$$

$$\Delta F(t) = {}^c F_d(t) - [{}^c_H T]^T F(t) \quad (2-67)$$

式中

$$A(\theta) = \begin{pmatrix} \theta_2 \cos(\theta_1) + l \sin(\theta_1) \\ \theta_2 \sin(\theta_1) - l \cos(\theta_1) \end{pmatrix}$$

$$[J] = \begin{pmatrix} l \cos(\theta_1) - \theta_2 \sin(\theta_1) & \cos(\theta_1) \\ \theta_2 \cos(\theta_1) + l \sin(\theta_1) & \sin(\theta_1) \end{pmatrix}$$

$$[{}^c_H T] = \begin{pmatrix} \cos(\theta_1) & -\sin(\theta_1) \\ \sin(\theta_1) & \cos(\theta_1) \end{pmatrix}$$

这些误差通过柔性选择矩阵可变成下列诸式:

$${}^c X_e(t) = [I - [\varphi]] \Delta X(t) \quad (2-68)$$

$${}^c \dot{X}_e(t) = [I - [\varphi]] \Delta \dot{X}(t) \quad (2-69)$$

$${}^c F_e(t) = [\varphi] \Delta F(t) \quad (2-70)$$

将上列诸式变成关节坐标系后组成控制规律时其式如下:

$$\theta_e(t) = [J]^{-1} {}^c X_e(t) \quad (2-71)$$

$$\tau_e(t) = [J]^T {}^c F_e(t) \quad (2-72)$$

$$\tau_p(t) = K_{p,i} \theta_e(t) + K_{p,i} \int \theta_e(t) dt + K_{p,d} \dot{\theta}_e(t) \quad (2-73)$$

$$\tau_f(t) = \tau_{f,i}(t) + K_{f,i} \tau_e(t) + K_{f,i} \int \tau_e(t) dt \quad (2-74)$$

$$\tau = \tau_p + \tau_f \quad (2-75)$$

式中 K_i 是比例系数, $\tau_{f,i}$ 是 $[J]^T {}^c F_e$ (前馈环节)。

图2-42是上述控制规律的原理图, 图中的饱和函数是为了抑止因库伦摩擦而使机械手的控制效果劣化而附加的。

图2-43是加在 ${}^c X$ 方向的力按1, 5, 10N变化及 ${}^c Y$ 方向保持一定位置时控制的实验结果。上升时间为0.15秒左右, 基本没有超调。

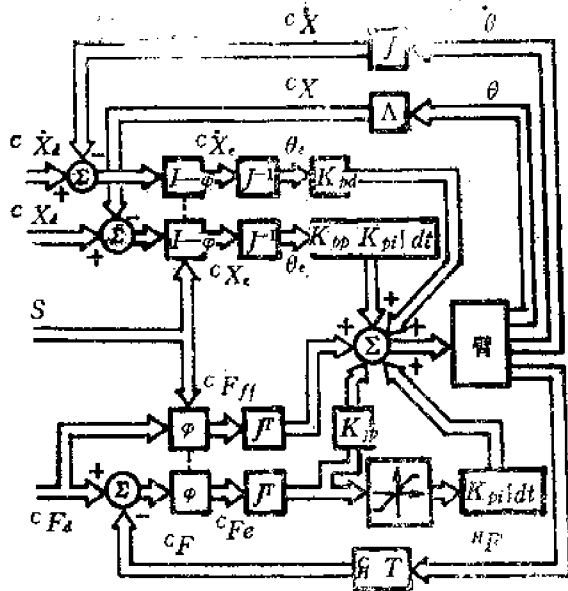


图2-42 2自由度机械手的混合控制系统

图2-44是X-Y工作台在 ${}^c X$ 方向上以0.65cm/sec的速度运动时的实验，加的力为5N。

以上实验的离散时间都是16.7msec，如果时间更小则超调量也变小，其稳定性也就提高了。有人把此控制扩展成3个自由度进行了插孔作业的实验。

§ 2-9 人臂形机械手的控制

近几年人们对多关节连杆机构组成的人臂形机械手的研究越来越多了，它与以往的机器人不同，具有冗余的自由度，一般把这种有冗余自由度的机械手叫人臂形。在日本，这种机械手有机械研究所的“美拉姆”（有多个冗余自由度的2只人臂形机械手），电子技术综合研究所的力矩可控式多关节形机械手和早稻田大学的瓦姆等。

人臂形机械手的研究工作之所以很活跃，一方面是因为以往的机器人结构在实际应用时有局限性，它不可能代替人所进行的各种操作。而这样的机械手都是用在工厂或对人有作业环境中，此外还用在大气层以外或海底作业中。

人臂形机械手的控制问题可按多自由度多变量系统来处理，这种系统的控制计算是很复杂的，用计算机进行实时控制很困难。而沃科布拉特维克等人把机械手的作业分成如下两个动作。

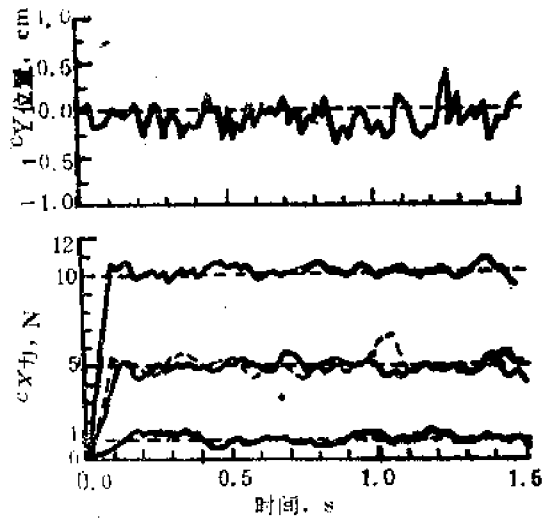


图2-43 实验例 I

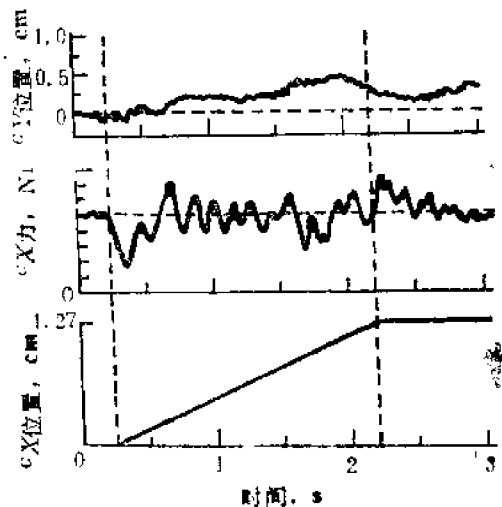


图2-44 实验例 I

(1) 沿着预先给定的手腕轨迹以记录运动速度变化的控制方式 (RMRC) 而运动;

(2) 利用手部的力反馈, 按规定的作业约束条件修正运作的方式而运动。

一 人臂形机械手的运动方程式

图2-45是由3个机械连杆组成的6自由度机械手简图。假定机械手的运动数学模型是以数字式计算机解微分方程式进行实时计算。

由关节周围的力矩平衡条件得如下的2阶微分方程式:

$$\mathbf{T} = \mathbf{H}(\boldsymbol{\theta})\ddot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{h}(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}) \quad (2-76)$$

式中 $\mathbf{T} = (T_1, T_2, \dots, T_6)^T$ 是各关节的驱动力矩向量; $\boldsymbol{\theta} = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_6)^T$ 是各关节角的向量; $\mathbf{H}(\boldsymbol{\theta})$ 、 $\mathbf{h}(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}})$ 分别是 6×6 的矩阵, 6 维向量。

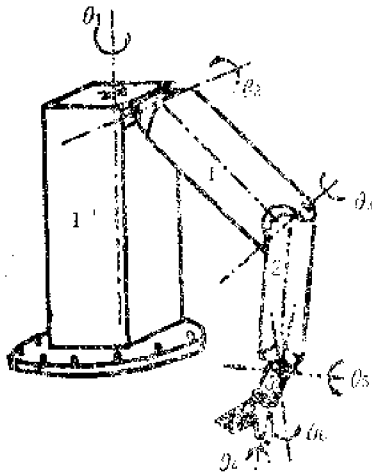


图2-45 人臂形机械手简图

机械手的运动方程式 (2-76) 可按图2-46所示的程序框图求得。

由方块1, 2, 以各关节结构确定的旋转矩阵可以计算出由第 j 关节到第 i 个连杆重心的向量 $\mathbf{r}_{j,i}$, 由固定坐标原点 O 到第 i 关节的向量 \mathbf{r}_i , 以及表示第 i 关节旋转方向的单位向量 \mathbf{e}_i 。在方框3内, 由 \mathbf{e}_i 与各关节角速度 $\dot{\theta}$ 按下式可求得各元素的角速度向量。

$$\boldsymbol{\omega}_i = \boldsymbol{\omega}_{i-1} + \dot{\theta}_i \mathbf{e}_i \quad (2-77)$$

由方框4, 5用下式可求得各元素的角加速度向量 \mathbf{e}_i , 加速度向量 \mathbf{W}_i 。

$$\mathbf{e}_i = \mathbf{e}_{i-1} + \ddot{\theta}_i \mathbf{e}_i + \dot{\theta}_i \boldsymbol{\omega}_{i-1} \times \mathbf{e}_i \quad (2-78)$$

$$\mathbf{W}_i = \mathbf{W}_{i-1} - \mathbf{e}_{i-1} \times \mathbf{r}_{i-1,i} - \boldsymbol{\omega}_{i-1} \times (\boldsymbol{\omega}_{i-1} \times \mathbf{r}_{i-1,i}) + \mathbf{e}_i \times \mathbf{r}_{i,i} + \boldsymbol{\omega}_i \times (\boldsymbol{\omega}_i \times \mathbf{r}_{i,i}) \quad (2-79)$$

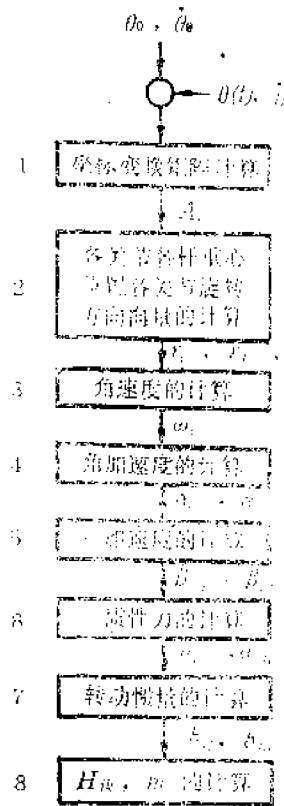


图2-46 导出运动方程式的程序框图

式中“ \times ”号表示向量积。

将上述各式整理如下。

$$e_i = \sum_{j=1}^i \alpha_{ij} \ddot{\theta}_j + \alpha_{i0} \quad (2-80)$$

$$W_i = \sum_{j=1}^i \beta_{ij} \ddot{\theta}_j + \beta_{i0} \quad (2-81)$$

以方框6用式(2-81)进行惯性力的计算:

$$F_i = -m_i W_i = \sum_{j=1}^i \alpha_{ij} \ddot{\theta}_j + \alpha_{i0} \quad (2-82)$$

由方框7,按欧拉方程式通过式(2-77)和式(2-78)可求得各元素的转动惯量 M_i 。

$$M_i = \sum_{j=1}^i b_{ij} \ddot{\theta}_j + b_{i0} \quad (2-83)$$

假定作用在第 j 个连杆上的外力与力矩为 G_j 、 M_j^e ,则由第 i 关节力矩的平衡条件得下式:

$$T_i = -e_i \cdot \left[\sum_{j=i}^n \{M_j + M_j^e + r_{ji} \times (F_j + G_j)\} \right] \quad (2-84)$$

由以上可得式(2-76)中的矩阵 $H(\theta)$, 向量 $h(\theta, \dot{\theta})$, 因此求得了机械手的数学模型:

$$H_{i,k} = -e_i \cdot \sum_{j=i}^n (b_{jk} + r_{ji} \times a_{jk}) \quad (2-85)$$

$$h_i = -e_i \cdot \sum_{j=i}^n \{r_{ji} \times (a_{j0} + G_j) + b_{j0} + M_j^e\} \quad (2-86)$$

式(2-76)按作业种类可分成如下两个计算方法。第一个是进行给定输入力矩时的机械手模拟。将式(2-76)改写成下式后通过积分即可求得 $\dot{\theta}$ 、 θ ;

$$\ddot{\theta} = H^{-1}(T - h) \quad (2-87)$$

第二个是当给定机械手的运动轨迹时,求出与之相对应的各关节力矩。通过对给定轨迹的时间微分,可求得 $\dot{\theta}$ 与 $\ddot{\theta}$,通过式(2-76)可计算出力矩向量 T 。

一般确定机械手作业时,选择适合其作业的坐标系。在此假定是以机器人肩部为原点的直角坐标系。这时,手腕的位置 $C(x, y, z)$ 作为轨迹是给定的,用它虽可求出关节角 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$,但是为了使关节能平稳地运动,采用了维特尼(Whitney)提出的RMRC方式,即在手腕与关节间的关系用下式表示。

$$x = f_1(\theta_1, \theta_2, \theta_3), \quad y = f_2(\theta_1, \theta_2, \theta_3), \quad z = f_3(\theta_1, \theta_2, \theta_3) \quad (2-88)$$

由式(2-88)的全微分可得下式:

$$\begin{vmatrix} \Delta\theta_1 \\ \Delta\theta_2 \\ \Delta\theta_3 \end{vmatrix} = A^{-1} \begin{vmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{vmatrix}, \quad a_{ij} = \frac{\partial f_i}{\partial \theta_j} \quad (2-89)$$

由式(2-89)可得到与微小位置变化量相对应的关节角度的变化量,所需的力矩由式(2-76)求得。 A 的具体形式如下:

$$\begin{aligned}
a_{11} &= -r_1 \sin \theta_1 - l_1 \cos \theta_3 \sin \theta_1 - l_2 (\cos \theta_2 \sin \theta_3 \sin \theta_1 - \sin \theta_2 \cos \theta_1), \\
a_{12} &= -l_1 \sin \theta_3 \cos \theta_1 - l_2 \cos \theta_2 \sin \theta_3 \cos \theta_1, \\
a_{13} &= -l_2 \sin \theta_2 \cos \theta_3 \cos \theta_1 - l_1 \cos \theta_2 \sin \theta_1, \\
a_{21} &= -r_1 \cos \theta_1 + l_1 \cos \theta_3 \cos \theta_1 + l_2 (\cos \theta_2 \cos \theta_3 \cos \theta_1 - \sin \theta_2 \sin \theta_3), \\
a_{22} &= -l_1 \sin \theta_3 \sin \theta_1 - l_2 \cos \theta_2 \sin \theta_3 \sin \theta_1, \\
a_{23} &= -l_2 (\sin \theta_2 \cos \theta_3 \sin \theta_1 - \cos \theta_2 \cos \theta_1), \\
a_{31} &= 0, \quad a_{32} = -l_1 \cos \theta_3 - l_2 \cos \theta_2 \cos \theta_3, \quad a_{33} = l_2 \sin \theta_2 \sin \theta_3
\end{aligned} \tag{2-90}$$

图2-47是按上述方法进行“喝水”实验的结果（将装水的杯子送向嘴边的动作）。由于没进行手指控制，所以动作并不完全，但可看出实现了手腕的平稳动作。

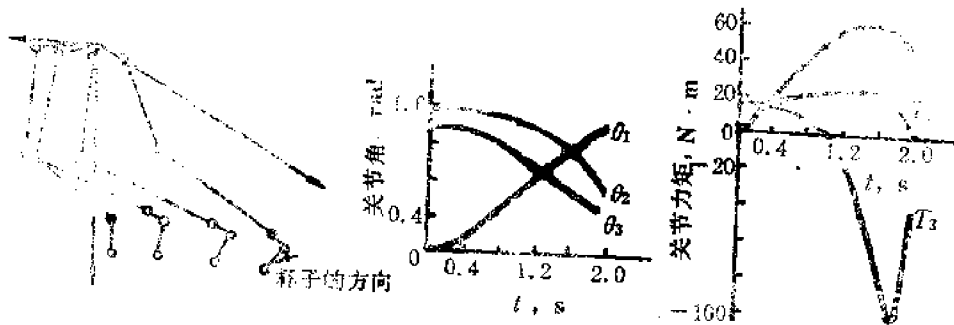


图2-47 机械手的轨迹控制例（喝水实验）

二 以力反馈进行手指的自适应控制

机械手在搬运对象物的同时，通过手指控制其方向。自动操作作业可以根据作业时应该满足的某一力学条件来定义。假定对象物的惯性力与转动惯量分别为 F_0 、 M_0 时，这时此条件可用下式表示：

$$f(F_0, M_0) = 0 \tag{2-91}$$

根据上式可决定手指部分各关节的驱动力矩，而沃科布拉特维克等人提出了采用力反馈的自适应控制方法。

假定被把持的对象物与手指间不产生滑动时，则下式应成立：

$$F_0 + G_0 + \sum_i (-R_i) + \sum_i R_i^E = 0, \quad M_0 + \sum_i r_{0i} \times (-R_i) + M^{RE} = 0 \tag{2-92}$$

式中 G_0 是对象物的重量； R_i 是手指力传感器 i 的检测输出； r_{0i} 是由对象物重心到传感器 i 的向量； R_i^E 、 M^{RE} 分别是外力与外力矩。若满足式 (2-86) 的 F_0^* 、 M_0^* 为已知时，则通过测量 R_i ，就可以式 (2-92) 计算出与理想值的误差 ΔF_0 、 ΔM_0 。从而可通过由传感器到各关节的驱动力矩反馈进行此误差的补偿。如果在手指与对象物间没有滑动，由式 (2-79) 可得下式：

$$\Delta F_0 = -m_0 \Delta \varepsilon_0 \times r_{0s} - m_0 \Delta \omega_0 \times (\Delta \omega_0 \times r_{0s}) = -m \Delta W_0 \tag{2-93}$$

$$\Delta M_0 = -I_0 \Delta \varepsilon_0 - \Delta \omega_0 \times (I_0 \cdot \Delta \omega_0) \tag{2-94}$$

式中 I_0 可通过对象物的转动惯量 J_0 和向对象物坐标变换矩阵 A_0 按下式求出：

$$I_0^k = \sum_{i=1}^3 A_0^i A_0^i J_i^k \quad (2-95)$$

以上是为了满足机械手规定的作业公式 (2-91), 通过式(2-93), (2-94) 对各关节角进行的修正。首先是按下式求出修正手部与对象物的运动以及所加外力的各关节修正力矩。

$$e_i \cdot \{r_{3i} \times (F_3 + G_3) + M_3 + r_{0i} \times (F_0 + G_0 + \sum_k R_k^3) + M_0 + M^{R^3}\} = -\Delta T_i \quad (2-96)$$

r_{0i} 是由第 i 关节到对象物重心的向量。然后, 用传感器测得的 R_i , 通过式 (2-92) 求 ΔF_0 与 ΔM_0 。由式(2-93)、(2-94) 求出 $\Delta \varepsilon_0$ 、 $\Delta \omega_0$, 通过下式的补偿力矩公式进行反馈补偿。

$$e_i \cdot [\Delta M_0 - I_3 \Delta \varepsilon_0 - \Delta \omega_0 \times (I_3 \Delta \omega_0) + m_3 r_{3i} \times \{-\Delta W_0 + \Delta \varepsilon_0 \times r_{30}^* + \Delta \omega_0 \times (\Delta \omega_0 \times r_{30}^*)\} + m_0 r_{0i} \times (\Delta W_0)] = -\Delta T_i^3 \quad (2-97)$$

式中 r_{30}^* 是手指部重心到对象物重心的向量; I_3 是通过手指部转动惯量 J_3 与向手部进行坐标变换矩阵 A_3 , 与式(2-95) 有相同的定义。

如把这种方法用于“喝水”实验, 首先使杯子与 z 轴平行, 再按杯中的水不外溢的条件对惯性力加以限制, 则式 (2-91) 变成如下条件:

$$M_0 = 0, |F_n| < \bar{F} \quad (2-98)$$

应用公式(2-97)、(2-98)使机械手运动的结果如图2-48所示。

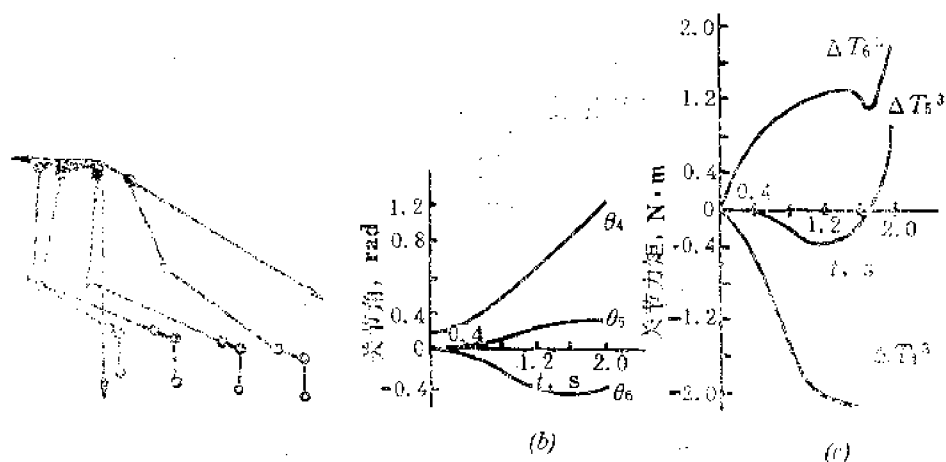


图2-48 用力反馈对手部的控制

三 插孔作业的控制

在插孔等装配作业中, 当工件等的放置是正确的, 并且机械手能以必要的精度进行位置控制时, 如能使机械手按预先给定的轨迹运动就足够了。但实际上, 工件的位置与尺寸事先是不知道的, 另外机械手的定位精度也不够。这时, 检测出反作用力后用其反馈进行修正动作, 实行位置控制的方法是有效的。下面介绍斯托科斯(Stokic)等人提出的方法。

在圆棒插孔作业中, 机械手受到反作用力其状态如图2-49所示。

当机械手作用有外力时, 其运动方程式如下:

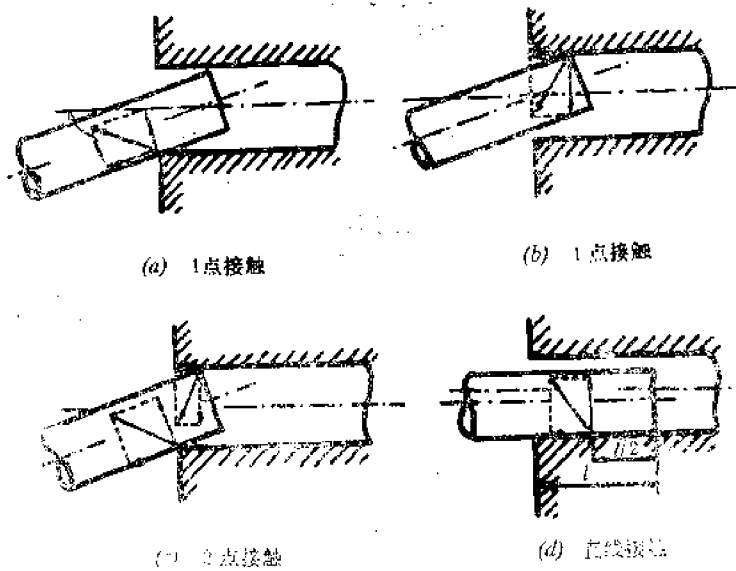


图2-49 插孔作业中的接触状态

$$T = H(\theta) \ddot{\theta} + h(\theta, \dot{\theta}) + \delta_1 C_1(\theta) R_{k_1} + \delta_2 C_2(\theta) R_{k_2} \quad (2-99)$$

C_i 是 6×3 的矩阵; δ_i 是有接触时为1, 其它情况为0的克罗内克符号。以式 (2-99) 表示的运动作为主系统, 把各关节执行机构直流伺服马达的运动作为子系统。子系统用下式表示:

$$\dot{x}^i = B^i x^i + b^i N(u^i) + f^i I_i \quad (2-100)$$

式中 $x^i = (\theta_i, \dot{\theta}_i, I_i)^T$, I_i 是第 i 个马达转子中流过的电流。 $N(u^i)$ 是表示放大器饱和特性的非线性函数。

当准确知道工件等的位置, 并没有初始状态的偏差时, 由式 (2-89) 可算出 θ , 通过式 (2-76) 和式 (2-100) 可求出必要的输入 u^i 。但是即使是按这个输入 u^i 使机械手运动, 实际的轨迹也要产生偏差, 因此棒与孔就要发生接触, 其结果就产生了反作用力。从而用此反作用力进行反馈可以补偿此偏差。因为以后只须考虑控制此偏差就可以了, 所以根据机械手与工件的位置将式 (2-99)、(2-100) 的运动方程式改成距标准值 $\theta^0(t)$ 的偏差形式, 而 $\theta^0(t)$ 是预先计算出来的:

$$\Delta T = H^0(t, \Delta\theta) \Delta \ddot{\theta} + h^0(t, \Delta\theta, \Delta \dot{\theta}) + \delta_1 C_1^0(t, \Delta\theta) R_{k_1} + \delta_2 C_2^0(t, \Delta\theta) R_{k_2} \quad (2-101)$$

$$\Delta \dot{x}^i = B^i \Delta x^i + b^i N(t, \Delta u^i) + f^i \Delta T_i \quad (2-102)$$

机械手的整体动特性可以通过 ΔT 将式 (2-101) 与 (2-102) 结合起来求得, 但其结果变成 18 阶非常复杂的非线性微分方程式。

这时用分散化控制的方法, 是可以使整个系统稳定的。即把 Δu^i 的控制规律按下式分成两部分:

$$\Delta u^i = \Delta u_L^i + \Delta u_s^i \quad (2-103)$$

Δu_i^j 是局部地使式(2-102)稳定化,其控制规律由下式确定:

$$\Delta u_i^j = -k_i^j D^i \Delta x^i \quad (2-104)$$

式中 D^i 是 2×3 的常数矩阵;而 k_i^j 是使用闭环系统的特征方程式 $\det(sI - B^i + b^i K_i^j D^i) = 0$ 的根在一定范围内任意配置时进行选择。 Δu_i^j 是按每个子系统个别给定的,而对子系统间的相互干扰没考虑在内。因此,当反作用力 R_k 不存在时,在标准轨迹 $x^0(t)$ 的附近则整个系统是渐近稳定的,当产生反作用力时,则不能忽略各子系统间的干扰,这时就必须考虑使整个系统稳定的控制规律。于是产生反作用力时,用传感器将它检测出来加以反馈,以减少反作用力对整个系统稳定性的影响。这时的控制规律 Δu_i^j 由下式决定:

$$\Delta u_i^j = K_{g1}^i F_g + K_{g2}^i M_g \quad (2-105)$$

$$F_g = \sum_{i=1}^L R_i = F_p + G_p + R_{k1} + R_{k2} \quad (2-106)$$

$$M_g = \sum_{i=1}^L r_{i0} \times R_i = M_p + r_{k10} \times R_{k1} + r_{k20} \times R_{k2} \quad (2-107)$$

式中 F_p 是对象物的惯性力; M_p 是转动惯量; G_p 是表示重力的向量。

对控制规律 Δu_i^j 的综合则归结为保证整个系统的稳定性而选择增益 k_{g1}^i 与 k_{g2}^i 的问题,例如,可按干扰为最小来选择 k_{g1}^i 与 k_{g2}^i 。

图2-50是间隙为0.03mm的插孔作业实验时反作用力的大小:(a)是动作的轨迹错误而发生嵌入的例子;(b)是轨迹指示正确而未加力反馈的例子;(c)是有力反馈的例子。

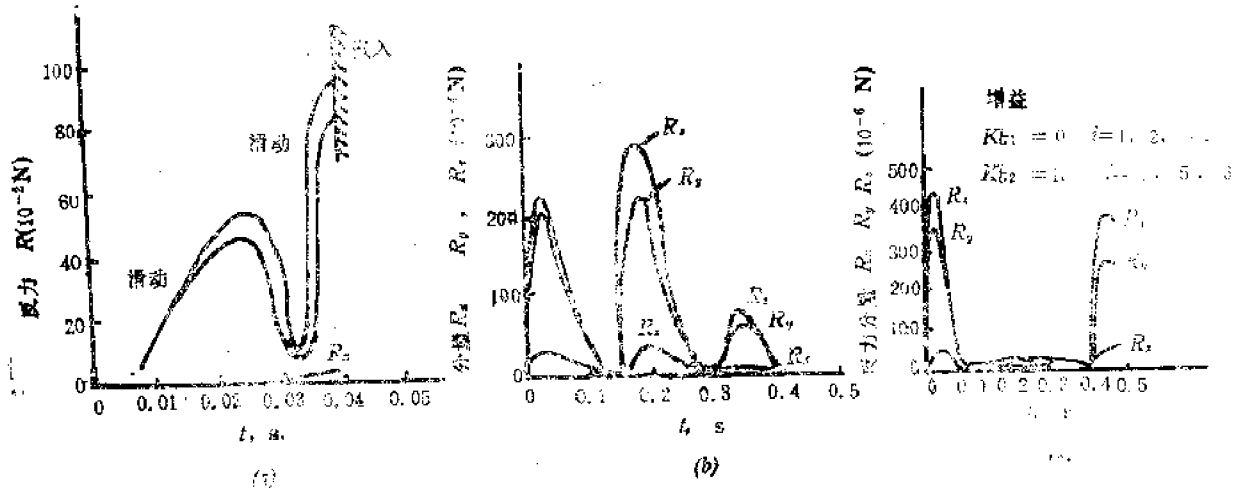


图2-50 插孔作业的实验

图2-51中的(b)是加入反馈时机械手各关节的运动,同图(c)是棒与孔的相对角度变化。

以上对沃科布拉特维克等人提出的力反馈人臂形机械手的控制方式进行了说明。从取代人进行作业的观点看,有必要使机械手与人具有相同的形态,组成同样控制方式。为了进行精细的作业,不加入力反馈是不行的。但是能否把人的感觉正确地再现的问题,由于还没有这样高性能的传感器,而且也不能把这些必要数量的传感器都装在机械

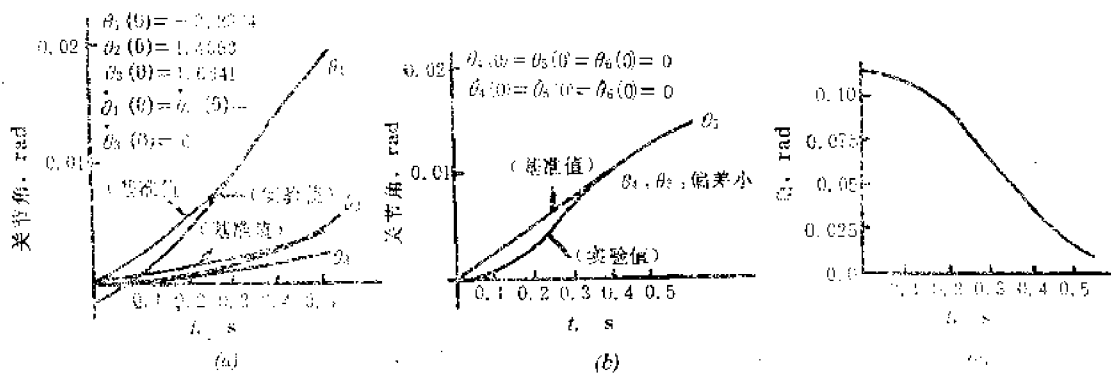


图2-51 力反馈控制

手上,受到硬件的限制而无法实现。从这个意义上来说,动物的另一个信息处理能力——视觉,在机械手的控制中也是一个非常重要的手段。

§ 2-10 机械手的遥控技术

在很久以前就出现了主从式机械手用以代替人在危险的环境下进行作业。在1947年高耶尔兹就研制了力矩反馈式的纯机械式机械手,进而又把它改成为电动式的。后来十几年间就使用这种形式的,其缺点是速度非常缓慢。到60年代开始了海底开发和医学的恢复训练等领域的应用研究,而60年代后期到现在发展成为电子计算机为主的控制了。

到现在为止,出现了各种远距离操作系统,但是能达到实用性能的仍然很少。现在世界上很多国家都面临着能源开发的问题,与此有关的远距离操作机械手系统的使用范围在日益扩大。例如有原子能电站的建立与维护,矿山中的采矿及海底石油开发等作业。在这些领域中需要高速动作且低成本的远距离操作系统。

一 远距离操作技术中存在的问题

下面简单介绍在研制遥控操作机械手系统时存在的技术问题。

操作人员首先必须通过摄像机或其它光学器械等捕捉到目标后直接控制机械手对其作业,并掌握作业内容,一旦出现问题还要设法解决。在这种系统中重要的问题是如何正确地把视觉信息送给操作人员,然后操作者又如何把指令传给机械手。

关于视觉处理在此不拟详述,作为摄像机的辅助装置有激光瞄准系统或激光跟踪系统。

如若目标及作业时的动作已定,则机械手可进行如下的装配与拆卸作业。此动作一般由两个控制方式来实现。即一个是将工件搬运到目标位置的开环控制;另一个是装配过程,测出每个工件由于接触而产生的反作用力,将其反馈而进行的闭环控制。在前者的控制中,如用维特尼提出的RMRC法使机械手定位时,并不关心机械手臂的结构,只考虑作业对象中的固有坐标就可进行操作了。而后的闭环控制方式其适应性非常好,在工件的位置或机械手的定位误差以及其它外界影响存在时也能稳定地工作。

今后,发展遥控操作技术的主要关键之一是机械手的设计。特别是为了使机械手受

到的反作用力能反馈给操作者，这种带执行器的主动机械手其结构变得复杂而笨重，从而其操作性能变差。日本海洋科学技术中心研制了带力反馈执行机构的外骨架形主动机械手，目前正朝着小型轻量化和提高操作性能方面努力。

二 遥控操作

一般，工业用机械手都是由人示教，然后按示教的程序进行工作。而遥控机械手，多数是操作者一边监视机械手的动作一边给出指令进行控制，把人也包括在控制环以内了。这时的人就是机械手的操作者。因此就出现了手动控制的问题，具体说就是出现了关于人的控制特性问题。

遥控机械手的控制方式有主从式(MS)与分级控制方式。而后者的分级控制方式又发展成维特尼提出的记录动作速度变化控制方式(RMRC)。

MS方式是以进行实际作业的机械手作为从动，主动机械手与从动机械手的形态是相同的。从动机械手是来自主动机械手各自由度的信息控制相应的各自由度的，因而使从动机械手实现与主动机械手相同的运动。一般情况下，控制指令是由装在操作者手臂上的主动手动作而发出的。

RMRC方式是由钳形操作杆或开关盒给定手部坐标系中的平移3个自由度与旋转3个自由度。机械手各自由度的控制指令是用计算机把上述来自操作杆或开关盒的输入分配给各轴的。不论那种方式，都是使用视觉、力感觉或触觉等让操作者了解机械手的状态，通过主动手或开关把操作指令给予机械手，这一点是相同的。

但是，如若把这样的遥控机械手用于其它天体时，由于信息的传递距离长以及通讯频道数的限制，人与机械手间的信息传递需要时间，这将导致机械手操作性的劣化。也就是说，由于操作信号与反馈信号的迟后而造成的操作性劣化使得操作者体力上易于疲劳，作业时间也要拖长。

为了解决上述问题，现在提出了几种方案。例如，赛力丹等人提出了一种监视方式，并进行了时间迟后对控制性能影响的实验。费列尔不用视觉反馈而只用力反馈按MS方式进行了位置控制的实验，研究了时间迟后对作业所需时间的影响，以及对动作稳定性的影响。此外斯塔尔用机械手把销子由一个孔移向另一个孔，进行了MS与RMRC方式有时间迟后的操作特性实验。斯塔尔的作法是使用了视觉反馈，而在MS方式时，视觉与力反馈并用。

这些实验是以操作者控制机械手时人的特性为主的，其研究内容相当深，下面简要地进行介绍。

三 有时间迟后的力反馈位置控制

费列尔在一个自由度的主从式结构上只用力反馈，进行了有时间迟后的位置控制实验。其实验装置如图2-52所示。

在环内有时间迟后时，操作者采取移动等待(MW)和连续运动(CM)的控制方法。SM方式是给机械手以小步长的指令，在其得到结果之前先等待一段时间，然后再根据

其信息决定下一个操作指令，是反复加入操作信息的方式。而CM方式是以最终位置进入允许误差内的低速度给出信号，直到目标位置信号出现，然后再给出指令修正其结果的一种方式。

对位置控制进行了两个实验。实验1如图2-52所示，在目标位置上放有一个方块体，控制主动侧以使从动侧的手指移动，是直到与方块体接触为止的位置控制。方块体重为1.45kg，与台体的静摩擦力为0.45kg。方块体随机地置于手指初始位置右侧的2.54、5.08、7.62、10.16cm处。

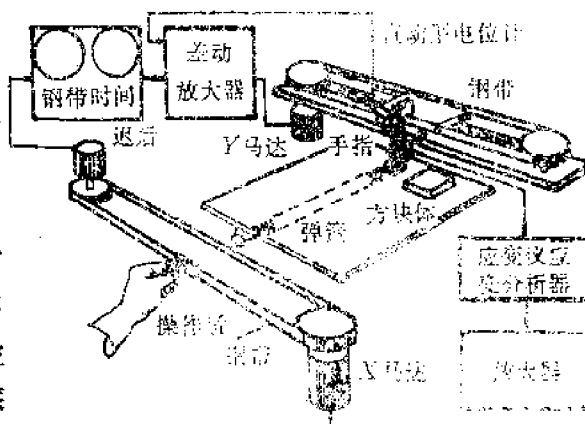


图2-52 实验装置

由动作开始直到与方块体接触3s钟以上的时间定为作业时间，把它测出来。但是方块体的允许移动量为2.54cm以内，所以移动距离超过它就认为是失败了，此数据不必记录。

在MW方式时，在方块体与手指接触之前反复进行移动与等待的动作，各移动量在2.54cm以内，方块体的移动也在允许值以内。CM方式时需要选择速度，在这一低速度下使得在迟后时间内方块体运动不超过允许距离。

实验2装设了一个弹簧，目的是给手指加一个与中间位置距离成比例的力，即是加了一个与位置偏差成比例的力反馈(0.06kg/cm)的位置控制。作为初始输入，把手指随机地放在距中间位置为3.8、7.62、11.43、15.24cm处，操作者尽可能快速返回中间位置。开始控制之后，作业完了，到操作者从主动侧离开手的时间定为作业时间并记录下来。如作业完了，手指的位置离开中间点为±1.9cm以上时就认为是失败了。

MW方式时，通过反馈到主动侧力的大小来预测中间位置而进行移动，一直到这个力不变化为止，这一动作反复进行，使力达到零为止。CM方式是在力达到零以前按一定速度运动，然后用同一速度向相反方向运动单位迟后时间之后停止指令，等待一段时间看力是否为零，如不为零以MW方式进行修正。

对上述2种实验，将2种控制方式与4种时间迟后(0, 0.3, 1.0, 3s)进行组合，各进行5次实验。操作者1人在事前进行了训练。实验1与实验2的结果分别由图2-53与图2-54所示。

两图的作业时间都是对4种移动距离取平均值。其结果如图2-53所示，MW方式不论迟后时间大小都需要较长的作业时间，而图2-54则相反，CM的作业时间较长。其结论是力反馈表示位置误差时MW方式有效，而在探索实验1这样的对象物时，则CM方式更有效。不论是那种情况，其作业时间都与迟后时间成比例。这与视觉反馈时的动作结果是相同的。

图2-53中MW方式的作业时间长的原因，是因为有迟后时间时维持与对象物的接触较困难，要产生跳跃现象。即使这种现象不存在，由于考虑它有发生的可能性致使移动

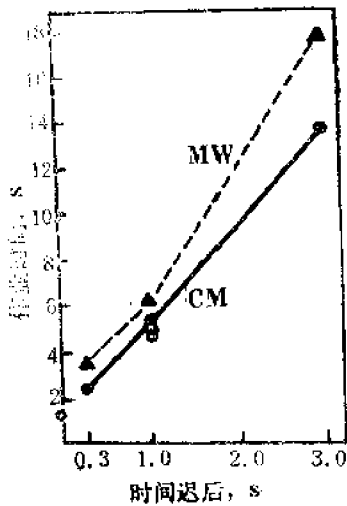


图2-53 探索对象物位置的控制作业时间

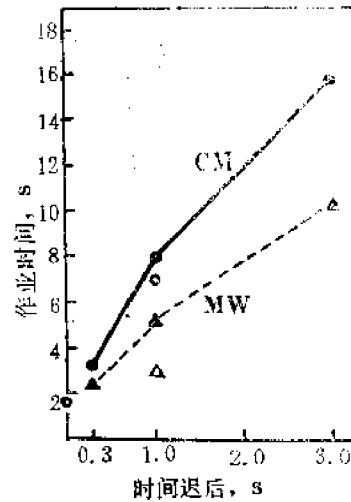


图2-54 力反馈时的位置控制时间

速度下降，从而延长了作业时间。这可理解为把反馈信号返回到发出指令的手是需要时间的。为此把反馈信号返回到不发指令的手。研究其作业时间是否会得到改善，这种情况叫做间接力反馈（与此相反，把力反馈信号返回到发指令的手时叫做直接力反馈），其结果如图2-53与图2-54中以○和△符号所示。不论哪种情况都得到了改善。

一般具有时间迟后大的伺服系统，闭环增益大于1时是不稳定的。因此，对上述的实验2，直接力反馈时的闭环增益与位移量对力的比值取多大时，人还可能进行控制的问题也进行了研究。即为了研究闭环的稳定性，在0.1s内加入1.33kg的力(3b)作为干扰信号，测出了使其为零的操作时间。对操作者也给以视觉信息，按迟后时间增大的顺序进行实验，对各种闭环增益与每个时间迟后进行10次实验。干扰是按左右概率相等产生的。

时间迟后大时，达到大的闭环增益6.65N/cm(3.81b/in)以上就不稳定了。由频率特性测出的假定稳定界限为10N/cm(5.81b/in)，只在迟后时间为0.3s时大致是正确的，对其它时间迟后是过高的。

结论是，即使回路中有时间迟后，直接力反馈也可用于远距离位置控制，如对操作者加以强的力反馈时，由于时间迟后而使闭环控制的优点丧失，有变成不稳定控制的危险。后者可能产生意想不到的冲击现象。但是为了避免这种现象发生，使闭环增益下降则使灵敏度下降，由于反馈能量的一部分是取决于冲击的速度，这并不是最好的方法。从使控制稳定，和保持力的灵敏性来看，前面所述的间接力反馈是有效的。

四 有时间迟后操作时MS方式与RMRC方式的比较

1. 实验装置

斯塔尔的实验是用维库卡尔(H. C. Vyukal)等人设计的NASA阿姆斯机械手进行的。

该机械手的臂是以旋转接头连接的8个圆锥形玻璃钢部分制成的。除了手部的五指

以外有7个旋转接头。主动臂与从动臂是几何相似的,操作者把手臂伸入主动臂中,以连续伺服方式对从动臂的各自由度进行位置控制。

对RMRC方式而言,操作者只要给定手的方向与速度即可,无须知道各自由度的速度。操作者可通过有6个自由度连接杆式指令输入装置,给定如图2-55所示手部直角坐标各轴的速度以及绕各轴的旋转速度。因为连接杆中有限位机构,它保证超过输入指令最大值的信号不能输出。

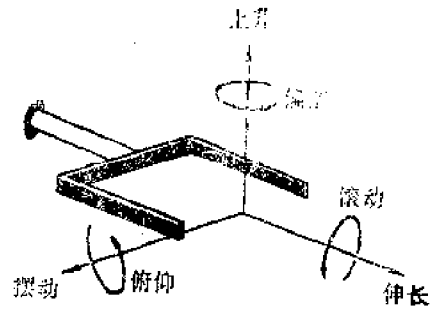


图2-55 手部固定坐标系

2. 作业

为了对2种控制方式进行比较,选择了移动作业。具体操作是从桌上左侧的容器中拔出销子运到右侧的容器,然后把销子插入它的孔中。把销子安全插入之后再拔出来返回到左面的容器。两个容器相距20cm,与水平面成 32° 倾斜角装在桌面上。此外右侧容器又相对左侧容器倾斜 27° 角。因此操作者进行作业的过程中必须改变销子的姿态。使用的销子有3种。长度各为10.16cm,直径分别为1.905、2.286、2.515cm,孔的直径为2.54cm。所以孔与销子的间隙是0.635、0.254、0.0254cm。以作业所用时间对作业进行评价。为便于分析,把作业时间分成以下3种进行测量。

- (1) 拔出时间 t_1 开始取销子到销子离开容器的时间。
- (2) 移动时间 t_2 销子离开容器之后移动到距另一个容器孔2cm所用的时间。
- (3) 定位与插入时间 t_3 自第(2)个时间完了到销子插入完成所用的时间。

用计算机监视作业的进行情况,测出 t_1 、 t_2 、 t_3 之后把它们记入磁盘。时间的检测精度为 $1/30$ s。 t_1 是外部有接触力存在,对手部位置精度无要求时用以评价操作的指标。 t_2 相当于粗定位所用的时间。 t_3 是与无约束力以定位精度为目的的动作及有约束力而需要对力进行调节的动作两者有关的作业时间。

3. 实验方法

实验参数中有控制方式 C ,时间迟后 T ,销子尺寸 P ,作业方向 D (方向1:由左到右;方向2:由右到左),操作者是一个人。操作者经过学习训练之后,进行各种参数组合的20次作业实验,全部作业为960次。对各种控制方式,销子尺寸大小与迟后时间是按随机给定的。在MS方式中,时间迟后为1.0、3.0s时操作者就感到相当疲劳了。

4. 实验结果

(1) 拔出作业 各种销子尺寸的 t_1 与时间迟后的关系如下(以3种迟后时间进行实验,其迟后时间分别为0.33、1.0及3s):

在MS方式下,随着销子直径的增加, t_1 增大其性能降低。对间隙最大的销子1来说,相对各种时间迟后具有较小的拔出时间,对销子2来说,在三种时间迟后下,MS比RMRC方式的作业时间小,而3s的时间迟后,则使RMRC方式有小的 t_1 。但是,这一差别并非是有意的。对销子3来说,所有的时间迟后RMRC方式的 t_1 时间都小。这时MS方式的标准偏差为RMRC方式的2倍以上。这意味着MS方式产生了“卡紧”现象。

对销子1、2可从动作的型式来说明 MS 方式的优越性。即这时的间隙相当大，不一定非要完全按孔的轴向方向拔出。因此，与方向精度相比拔出的速度对 t_1 的影响较大，因此MS方式比RMRC方式的速度特性好。

但是对销子3来说，拔出动作的性质变了。0.254cm的间隙对拔出的方向精度有很大影响。三种销子的插入深度与允许偏斜角大小的关系，由实验可知，与1、2相比销子3的偏斜角最小。

有时间迟后时，由于操作者以开环进行控制，上述的实验结果说明，RMRC 方式用开环控制有较好的方向精度。对 RMRC 方式，只要给出将手部移到容器上方抓住销子并提起的指令即可。手部沿着孔轴运动，就可以把销子顺利地拔出来。这时只有输出一个信号的控制开关起作用。

MS 方式时，操作者监视着接触力，必须使它变为零。这时的力反馈是非常有效的，但是当存在时间迟后时，力反馈系统有时产生不稳定。

(2) 移动作业 当然，销子尺寸不变，由T的检测结果，MS方式的移动作业时间短。这可以MS方式具有较高的速度特性来加以理解。

图2-56是移动作业的方向与作业时间的比较。MS 方式，对所有的的时间迟后，方向2比方向1的作业时间小，且比RMRC方式的小。这是因为主动臂的机械阻抗是随方向不同而异的。又，主动手臂有7个自由度，向方向2移动时关节的旋转不一定是方向1的反方向，实际上是因为方向1必须使很多关节运动，与低阻抗的移动方向不一致。

RMRC 方式中并不存在这样的不等方向性。这时，操作者与机械手分离，不论向哪个方向都可同样地运动。

(3) 定位与插入作业 图2-57 是表示销子1相对时间迟后的定位与插入作业所需时间的关系。RMRC方式随着迟后时间增大其性能降低较小。它与拔出作业相似，这是因为它是拔出作业的相反过程。

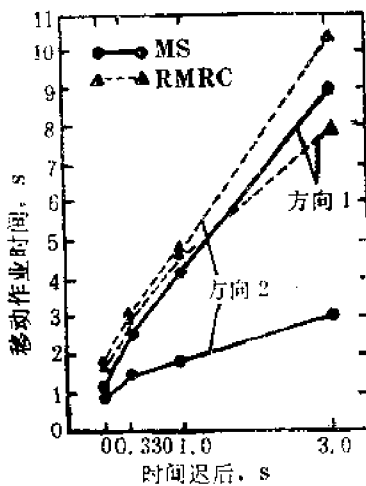


图2-56 方向1方向2的移动作业时间

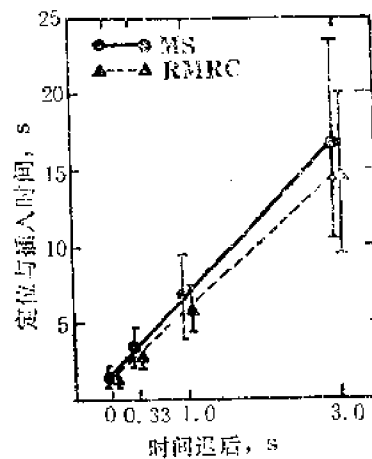


图2-57 销子1的定位与插入作业时间

五 结论

由于是通过操作人一人的实验，虽然说不出什么肯定性的结论，但是当有时间迟后

的操作以精度为重点时, RMRC方式比MS方式更有效。没有时间迟后时, MS方式较好。其理由之一是因为对RMRC方式来说, 使机械手保持在静止状态较容易, 为了得到反馈信号, 希望处于动作停止状态。又因RMRC方式尽管是开环控制却有较高的定位精度, 但是作业难度也是其特点, 有3s时间迟后时, 与MS方式相比操作者在体力上与精神上都易于疲劳。

以上的结果给我们以启发, 即在有时间迟后的操作中, 把MS与RMRC方式组合起来的控制系统是合适的。其组合方式是MS方式承担粗的位置控制, RMRC方式用于精确的定位, 但是两种方式如何切换是个现实的问题。

§ 2-11 机器人手臂的改进形粗控制方式

正如 § 2-10 节所述, 机器人的手臂、手部的轨迹控制问题如下。如果知道机械手结构部分的参数, 严密地表示机械手运动方程式虽然是可能的, 但使手部按所需轨迹实现实时的运动也是困难的。这是因为机械手的运动方程式是非线性的, 而为了进行实时控制求解运算的工作量太大了。因此到目前为止, 都是试图使用近似方法使计算时间减少而实现实时控制, 对此提出了很多方案。

在此, 作为解决这一问题的方法, 从另一个角度来观察机械手的动作。为了使用机械手进行作业, 能把手部的位置、姿势 $x(t)$ 或力矩 $F_x(t)$ 作为时间的函数进行描述就可以了。为此必须知道各自由度的位移 $\theta(t)$ 、力矩 $F_x(t)$, 并依次确定实现上述动作各时间的驱动力矩 $T(t)$ 。在下述讨论中, 假定已经求出了与给定轨迹相对应的 $\theta(t)$, 所以下面的问题就是如何确定 $T(t)$ 了。

但是机械手的作业, 按维特尼的说法可以分成两个动作, 一个是从手部的初始位置向对象物附近移动的粗动作; 另一个是象把持对象物一样, 即随着手部与外界的接触而产生的精密动作。前者不需要进行力反馈, 只实现轨迹就可以。作为一种方法, 用位移与速度推算各自由度的力矩进行反馈的方法, 贝基齐(Bejczy)对此法进行了试验, 以求缩短处理时间。还有杜波夫斯基和德斯弗格斯等人对反馈增益运用了参考模型式自适应控制, 帕尼尔(Panel)等改变了以前的拉格朗日方法, 用牛顿-欧拉法的公式使运算时间几乎与自由度成比例地大为缩短。

另外, 在实现精密动作时, 必须检测力或力矩。力传感器是最早用于力反馈机械手的, 后来又进行了种种尝试, 有人用驱动马达的电流来推算出力矩。

一 用估计、测定力矩的控制方式

匈牙利的加库毕克和马尔顿以表 2-7 对上述两个轨迹控制的实际作业时间进行了比较, 他们认为, 要提高作业的效率, 有必要提高粗控移动动作的速度, 为了提高其高速化的稳定性, 提出了将按位移与速度推算出的力矩和在关节处实测出的力矩进行反馈的控制方式。下面具体介绍这种方法。

假定控制对象是 6 自由度的机械手, 其运动方程如式(2-108)所示:

表 2-7 两个动作的作业时间比较(%)

作 业	精密动作	箱 动 作
喷 涂	—	100
把 持	10	90
点 焊	20	80
装 配	50	50
研 磨	90	10

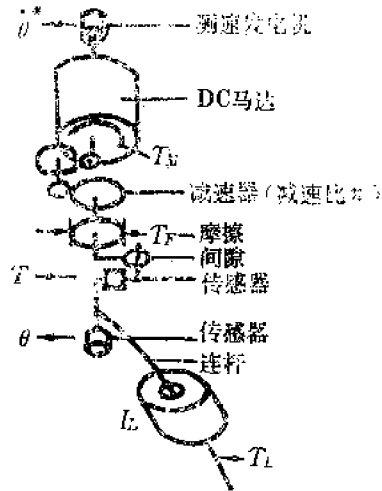


图 2-58 机器人的关节结构

$$T = A(\theta) \ddot{\theta} + \begin{vmatrix} \dot{\theta}^T B_1 & \dot{\theta} \\ \dot{\theta}^T B_2 & \dot{\theta} \\ \vdots & \vdots \\ \dot{\theta}^T B_6 & \dot{\theta} \end{vmatrix} + D(\theta) \quad (2-108)$$

式中 \$T\$、\$\theta\$、\$\dot{\theta}\$、\$\ddot{\theta}\$、\$D\$ 是 \$6 \times 1\$ 的列向量，\$A\$、\$B_i\$ 是 \$6 \times 6\$ 矩阵。图 2-58 是表示各自由度的结构。在此忽略了传递系统的间隙和结构的柔性，为了简化把减速比定为 1，对第 \$i\$ 关节有式 (2-109) 成立。

$$T_i = T_{M_i} - I_{M_i} \ddot{\theta}_i - k_{R_i} \dot{\theta}_i - k_{F_i} \text{sign} \dot{\theta}_i = I_{L_i} \ddot{\theta}_i + T_{L_i} \quad (2-109)$$

式中 \$T_{M_i}\$ 是马达力矩，\$I_{M_i}\$ 是马达与驱动系统的转动惯量，\$k_R\$ 是反力矩的系数，\$k_F\$ 是摩擦系数，\$I_{L_i}\$ 是负载的转动惯量，\$T_{L_i}\$ 是负载力矩。

其次，矩阵 \$A\$ 是式 (2-111) 所示的只有对角元素的 \$A^*\$ 与另外的 \$A^{**}\$ 的和。由式 (2-109)、(2-110) 的比较可得式 (2-112)、(2-113)：

$$T = A^*(\theta) \ddot{\theta} + A^{**}(\theta) \dot{\theta} + \begin{vmatrix} \dot{\theta}^T B_1 & \dot{\theta} \\ \dot{\theta}^T B_2 & \dot{\theta} \\ \vdots & \vdots \\ \dot{\theta}^T B_6 & \dot{\theta} \end{vmatrix} + D(\theta) \quad (2-110)$$

$$A^* = \begin{vmatrix} A_{11} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & A_{22} & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \\ 0 & \dots & \dots & A_{66} \end{vmatrix}, \quad A^{**} = \begin{vmatrix} 0 & A_{12} & \dots & A_{16} \\ A_{21} & 0 & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \\ A_{61} & \dots & \dots & 0 \end{vmatrix} \quad (2-111)$$

$$I_L = A^*(\theta) \quad (2-112)$$

$$T_L = A^{**}(\theta) \dot{\theta} + \begin{vmatrix} \dot{\theta}^T B_1 & \dot{\theta} \\ \dot{\theta}^T B_2 & \dot{\theta} \\ \vdots & \vdots \\ \dot{\theta}^T B_6 & \dot{\theta} \end{vmatrix} + D(\theta) \quad (2-113)$$

按上述方法加给马达的指令信号为

$$T_M = T_f + T_A + T_L \quad (2-114)$$

式中 T_f 是以一般的位置、速度反馈信号，在 $(r+1)$ 采样时间其值为

$$T_{f,r+1} = I_L [G_1 (\dot{\theta}_{dr} - \dot{\theta}_r) + G_2 (\theta_{dr} - \theta_r) + G_3 \int (\theta_{dr} - \theta_r) dt] \quad (2-115)$$

式中 I_L 是实际的转动惯量； G_1 、 G_2 、 G_3 是反馈增益；下标 d 表示为目标值(或期望值)。

T_A 是补偿负载力矩加速度成分的前馈信号，由式(2-116)决定：

$$T_{A,r+1} = A^*(\theta_{dr+1}) \ddot{\theta}_{dr+1} \quad (2-116)$$

T_L 是负载力矩的变化，是测定值与按式(2-109)(2-110)计算值的差：

$$T_{L,r} = T_r - A^*(\theta_r) \ddot{\theta}_r \quad (2-117)$$

对 $(r+1)$ 采样时间，用其前面时点的值，按式(2-118)~(2-120)外推之后而求得：

$$T_{L,r+1} = T_{L,r} \quad (2-118)$$

$$T_{L,r+1} = T_{L,r} + 2(T_{L,r} - T_{L,r-1}) \quad (2-119)$$

$$T_{L,r+1} = T_{L,r-2} + 3(T_{L,r} - T_{L,r-1}) \quad (2-120)$$

控制系统的方块图如图2-59所示。

上述的控制其运算工作量非常小，但是计算时在处理方法上是比较困难的，故用计算机模拟进行了控制动作的实验。

二 计算机模拟

控制对象是6自由度机械手，对其中三个自由度进行了模拟。模型的详细结构是按式(2-109)、(2-110)组成的，控制系统则用式(2-115)~(2-118)。为便于比较，控制装置的方块图如图2-60(a)、(b)所示。(a)是由马尔凯维奇(Markewicz)的位移、速度估计出力矩后再将其反馈的方法。(b)是只用一般的位移和速度进行反馈方法的模拟。所用参数如下：

$$G_2 \approx G_1^2/4, \quad G_3 \approx G_1^2/4 \quad (2-121)$$

$G_2 = 300$ ， T_s 是采样时间，为0.01s， T_c 是控制信号的运算时间，为0.005s， T_M 是模型的运动方程式的积分间隔时间，为0.001s。

如图2-61所示，手部是以①到⑦的直线轨迹为目标值，其动作的加速度是正弦波。

实验的第一步是研究参数变化而引起的控制误差的结果，特别是当增益增加时 $G_2 = 600$ 是第一、第二控制方法的稳定界限，而对第三方法是不稳定的。下面研究一下第一、第二方法的控制结果。其结果的一部分如表2-8所示。

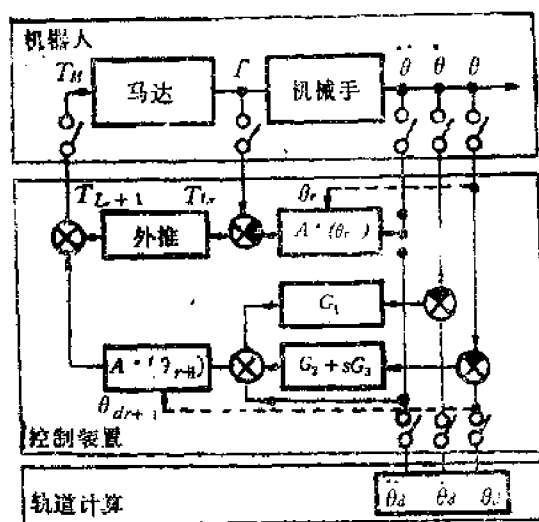


图2-59 控制系统的方块图(第一方法)

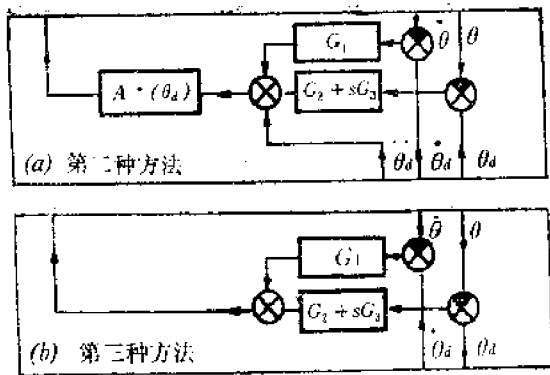


图2-60 控制系统的方框图

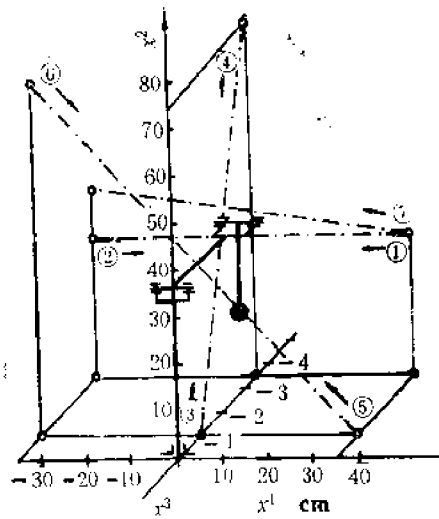


图2-61 目标轨迹

表 2-8

实验结果

目标轨迹	控制方法 №	t_0 s	轨迹长度 cm	$ \Delta\theta_{i\max} $, rad/100			$ \Delta\theta_i(t_0) $, rad/100			$ T_{i\max} $, N·m/100		
				i=1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	1	0.5	70	2	2	8	1	0	2	2	2	0.3
1	2	0.5	70	2	9	16	1	8	12	2	3	0.3
1	1	2	70	0	1	4	0	1	2	0	1	0.3
1	2	2	70	0	3	9	0	0	0	0	2	0.4
3	1	0.5	78	0	9	8	0	1	3	0	8	0.8
3	2	0.5	78	0	12	24	0	5	10	0	8	1
4	1	0.5	78	0	9	10	0	1	0	0	8	0.9
4	2	0.5	78	0	8	13	0	8	12	0	3	0.6
5	1	0.5	95	15	43	17	5	1	3	59	85	18
5	2	0.5	95	28	49	95	9	14	36	29	89	27
5	1	2	95	2	6	5	1	1	2	2	6	0.4
4	2	2	95	5	11	21	1	6	17	2	6	0.4

表中, t_0 是表示由轨迹的一端移动到另一端的时间。图2-62是表示轨迹①的位移、速度误差变化的情况。由图可看出, 对第一方法, 即使是 $t_0 = 0.5s$ 其误差也基本上不增加。然而第二方法其误差则增加很大。

为使上述方法更实用, 必须研究采样时间、外推及力矩测定对稳定性的影响, 在经过这些努力之后, 这种方法就构成了开发测定关节力矩的精密动作控制算法的第一步。

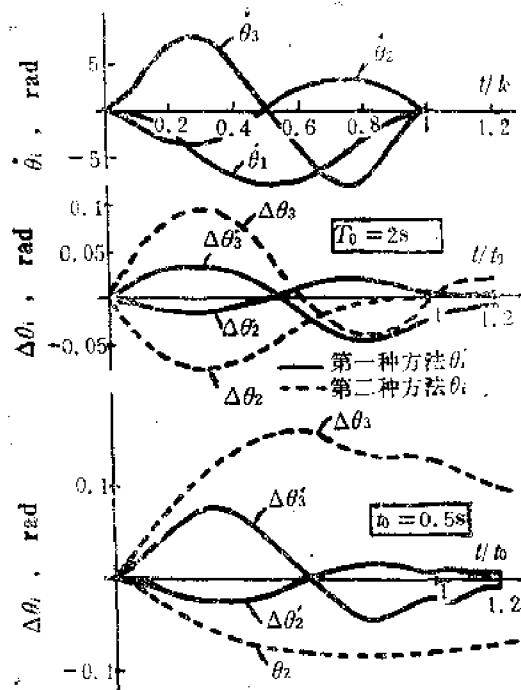


图2-62 目标轨迹①中的关节位移与速度误差

§ 2-12 控制的高速化

由 § 2-3 可知，只是对机械手进行轨迹控制一项就需要很大的计算工作量。这一点是与机械手如何快速、精确运动有密切关系的，卢赫(Luh)的研究结果表明，多数机械手的动态带宽为10几赫兹左右，因此，控制的采样时间必须在 $1/50s$ 以下，从实验结果来看，为了取得满意的响应特性，必须以 $0.01s$ 的采样时间进行控制。采样周期为 $100Hz$ 的数值，在目前机械手用微机水平的计算机进行控制时，是一个非常严苛的数值，一般是难于达到的。比如，即使是进行位置指令型的控制也不是一件简单的事。更何况在力矩指令型的情况下，按给定计算式进行运算就更不可能实现了。因此，提出了很多简化计算或忽略式中的某些项的所谓近似方法。下面依次介绍这些方法（参考图2-17）。

一 由作业空间到关节角的坐标变换

坐标变换是求解包括三角函数与反三角函数在内的非线性联立方程组的复杂工作，但也提出了不直接解此方程的几种方法。候亨(Hohn)提出了将直角坐标系变换成关节角度值的变换中使用牛顿-拉弗森(Newton-Raphson)逐渐近似的方法。另外中野等人提出的方法是把作业空间内机械手的可动范围用粗的区间加以分割，预先计算出手部在其方格点上时的各关节角度，把这些数据存储起来，经过插补之后求出实际的关节角。

帕维尔是把作业空间的轨迹分解为直线，通过插补进行控制，估计偏离轨迹的误差。

二 位置指令型控制

位置指令型,是把所求的关节角 $\theta(t)$ 的数值加在各关节上,但是 $\theta(t)$ 的函数不能以式表示时,必须把每个采样时间的数值存储起来。因此,采样时间越短,存储容量就越大。从而提出了用多项式斯普拉因函数近似表示 $\theta(t)$ 的方法。特别是斯普拉因函数在近似区间的两个端点是在一阶微分以内连续的,所以不仅是位置,就是速度也可作到圆滑的近似。

这种方法的问题是近似点的取法。图2-63(a)是在时间间隔一定时取得的近似点,(b)是考虑近似的最优化的情况。其近似精度的好坏是一目了然的。 $\theta(t)$ 不太复杂时可用试凑法选择近似点,但是一般应注意选择有速度变化的地方。

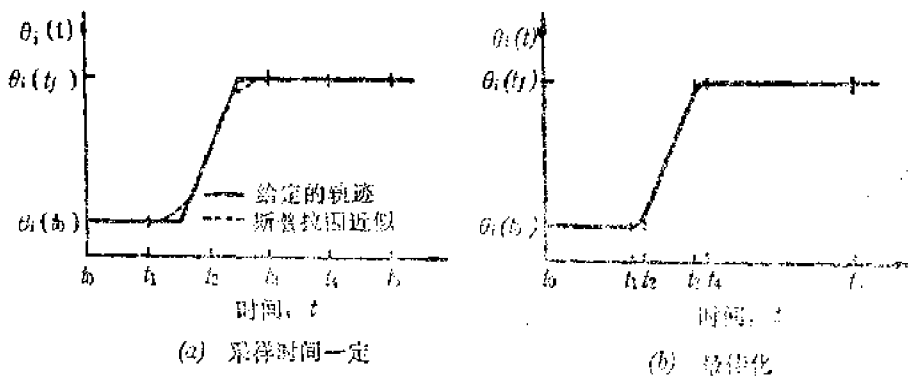


图2-63 轨迹的斯普拉因近似

$\theta(t)$ 可按式近似,

$$\theta(t) = A_i \mathbf{b}(t), \quad \mathbf{b}(t) = (t^3, t^2, t, 1)^T, \quad \theta(t) = (\theta_1(t), \dots, \theta_n(t))^T \quad (2-122)$$

A_i 是 $n \times 4$ 的系数矩阵, t 是时刻 t_{i-1} 到 t_i 的变化,当角度 $\theta(t)$ 、角速度 $\dot{\theta}(t)$ 在端点 t_{i-1} 、 t_i 给定时, A_i 可由下式给出:

$$[\theta(t_{i-1}) \dot{\theta}(t_{i-1}) \theta(t_i) \dot{\theta}(t_i)] = A_i [\mathbf{b}(t_{i-1}) \dot{\mathbf{b}}(t_{i-1}) \mathbf{b}(t_i) \dot{\mathbf{b}}(t_i)] \quad (2-123)$$

则由上式可求得 A_i :

$$A_i = [\theta(t_{i-1}) \dot{\theta}(t_{i-1}) \theta(t_i) \dot{\theta}(t_i)] [\mathbf{b}(t_{i-1}) \dot{\mathbf{b}}(t_{i-1}) \mathbf{b}(t_i) \dot{\mathbf{b}}(t_i)]^{-1} \quad (2-124)$$

如果执行机构的动特性也考虑在内,可用一阶迟后系统近似,

$$G(s) = (sI + K)^{-1} K \quad (2-125)$$

则系数矩阵 A_i' 如下式所示:

$$A_i' = A_i + K^{-1} A_i Q \quad (2-126)$$

式中 K 是对角增益矩阵,而 Q 是满足下式的系数矩阵,

$$\dot{\mathbf{b}}(t) = Q \mathbf{b}(t) \quad (2-127)$$

用上述方法, $\theta(t)$ 可通过式(2-122)近似地求得,用开环形式就可控制位置指令型的机械手。

三 力矩指令型控制

控制力矩指令型机械手时，计算就更复杂了。如果 $\theta(t)$ 给定，按式(2-8)就可预先求出力矩 T 。但是系数 H 、 h 与机械手把持的物体重量有关，如果物体重量改变时，与其相应的系数值也变化，这时各关节的运动时快时慢，就要发生偏离给定轨迹的现象。

为了解决上述问题，不用把事先计算所得的力矩存储起来，而是考虑把负载的重量等与当时的条件结合起来，用计算机求解式(2-8)，而对各关节进行控制。

如上所述，为了使机械手得到希望的响应特性，必须在 10^{-2} 秒的时间以内完成必要的运算。但是对于一个有6个自由度的机械手来说，如用PDP11/45微机进行计算时，有人通过计算证明需要用7.9秒的处理时间。因此，为了高速计算此力矩提出了如下几种方法。

帕维尔对特殊结构的机械手找出了加速度与重力项用对角矩阵近似的方法，使运算时间大为缩短了，但这对一般的机械手是不适用的。

卢赫等人则不直接从式(2-8)求力矩，用牛顿-欧拉法得出的复原运算法，其运算效率很高，使运算时间大为缩短。

另外，又提出了用多个微处理器组成复数处理器，进行并行运算处理的方法。下面大致介绍卢赫等人提出的方法。

这种方法是在式(2-8)中找出运算的复原性进行计算机的反复计算，通过计算使其复原，这是一种很好的方法。下面举一个多关节形机械手的例子。

如图2-64所示，假定固定在第 i 个臂两端的第 i 关节、第 $i+1$ 关节上的坐标系分别为 (x_i, y_i, z_i) 、 $(x_{i+1}, y_{i+1}, z_{i+1})$ ，作业空间坐标为 (x_0, y_0, z_0) ； θ_i, v_i, ω_i 分别是第 i 关节的角度，作业空间内的速度向量及角速度向量； P^* 是由第 i 关节到第 $(i+1)$ 关节的作业空间内的位置向量； A_{i+1}^i 是由坐标系 $(i+1)$ 到 i 的 3×3 坐标变换矩阵。

$\omega_i, \dot{\omega}_i, v_i, \dot{v}_i$ 按下式求得：

$$A_i^0 \omega_i = A_i^{i-1} (A_{i-1}^0 \omega_{i-1} + z_0 \dot{\theta}_i) \quad (2-128)$$

$$A_i^0 \dot{\omega}_i = A_i^{i-1} [A_{i-1}^0 \dot{\omega}_{i-1} + z_0 \ddot{\theta}_i + (A_{i-1}^0 \omega_{i-1}) \times (z_0 \dot{\theta}_i)] \quad (2-129)$$

$$A_i^0 v_i = (A_i^0 \omega_i) \times (A_i^0 P^*) + A_i^{i-1} (A_{i-1}^0 v_{i-1}) \quad (2-130)$$

$$A_i^0 \dot{v}_i = (A_i^0 \dot{\omega}_i) \times (A_i^0 P^*) + (A_i^0 \omega_i) \times [(A_i^0 \omega_i) \times (A_i^0 P^*)] + A_i^{i-1} \times (A_{i-1}^0 \dot{v}_{i-1}) \quad (2-131)$$

式中 $v_0 = \omega_0 = \dot{\omega}_0 = 0$ ， $\dot{v}_0 = (0, 0, 9.8m/s^2)^T$ ， $z_0 = (0, 0, 1)^T$ ， \times 是向量积。如

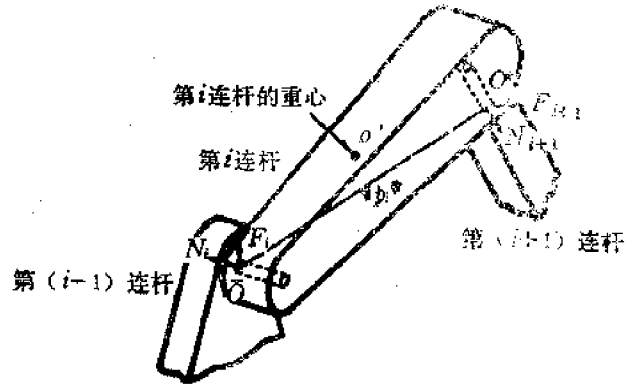


图2-64 动臂间的关系

假定 $A_i^0 \hat{s}_i$ 是与第 i 个臂重心的坐标 i 相对应的位置向量, 则此重心的速度 \hat{v}_i 与加速度 $\dot{\hat{v}}_i$ 由上式求得,

$$A_i^0 \hat{v}_i = (A_i^0 \omega_i) \times (A_i^0 \hat{s}_i) + A_i^0 \dot{v}_i \quad (2-132)$$

$$A_i^0 \dot{\hat{v}}_i = (A_i^0 \dot{\omega}_i) \times (A_i^0 \hat{s}_i) + (A_i^0 \omega_i) \times [(A_i^0 \omega_i) \times (A_i^0 \hat{s}_i)] + A_i^0 \ddot{v}_i \quad (2-133)$$

由以上各式, 可求出加在第 i 个臂上的力 F_i 与力矩 N_i 如下,

$$A_i^0 F_i = m_i A_i^0 \dot{\hat{v}}_i \quad (2-134)$$

$$A_i^0 N_i = (A_i^0 J_i, A_i^0) (A_i^0 \dot{\omega}_i) + (A_i^0 \omega_i) \times [(A_i^0 J_i, A_i^0) (A_i^0 \omega_i)] \quad (2-135)$$

第 i 个关节所需的力矩 τ_i 可按式求得,

$$A_i^0 f_i = A_i^{i+1} (A_{i+1}^0 f_{i+1}) + A_i^0 F_i \quad (2-136)$$

$$A_i^0 n_i = A_i^{i+1} [A_{i+1}^0 n_{i+1} + (A_{i+1}^0 p_i^*) \times (A_{i+1}^0 f_{i+1})] \\ + (A_i^0 p_i^* + A_i^0 \hat{s}_i) \times (A_i^0 F_i) + A_i^0 N_i \quad (2-137)$$

$$\tau_i = (A_i^0 n_i)^T (A_i^{i+1} z_0) + \eta_i \dot{\theta}_i \quad (2-138)$$

m_i 、 J_i 分别是第 i 个臂的质量和转动惯量, η_i 是执行机构的摩擦系数。

以上的公式, 计算程序框图如图 2-65 所示。

表 2-9 各种计算方法的计算时间比较

计算方法	算法语言	计算时间
拉格朗日法	FORTRAN	7.9 s
贝基奇近似法	FORTRAN	0.0025 s
卢赫等人的方法	FORTRAN	0.0335 s
卢赫等人的方法	阿申布拉	0.0045 s

表 2-9 是用反复计算法计算与以前用的拉格朗日法及贝基奇的近似法所需计算时间的比较。计算例题是以图 2-66 所示的斯坦福机械手为对象的。对各关节 i 按 $\theta_i = 0.2 \text{ rad}$, $\dot{\theta}_i = 1 \text{ rad/s}$, $f_0 = n_0 = 0$ 进行计算的。

贝基奇的近似法运算时间短, 但因对加速度与重力项以对角矩阵近似之后求出力矩, 所以按式 (2-8) 不能求出准确值, 要产生误差。

最终, 卢赫等人按此方法, 把浮动小数点演算部分硬件化, 用阿申布拉语言, 以 0.0045 秒由给定轨迹求出了力矩。但是

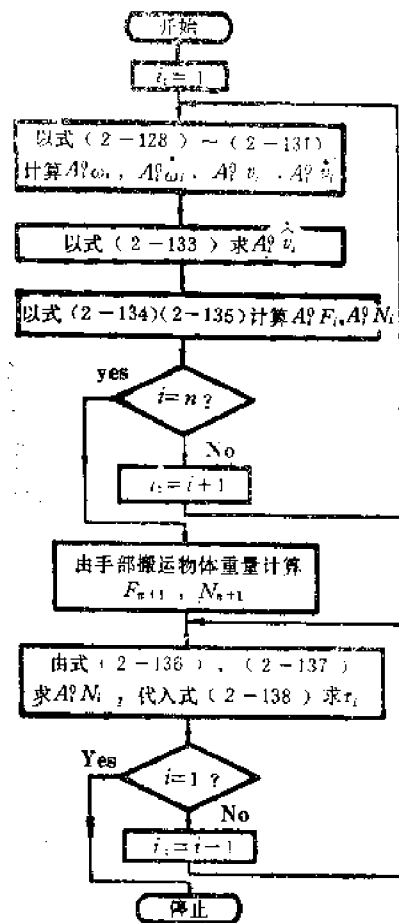


图 2-65 计算程序框图

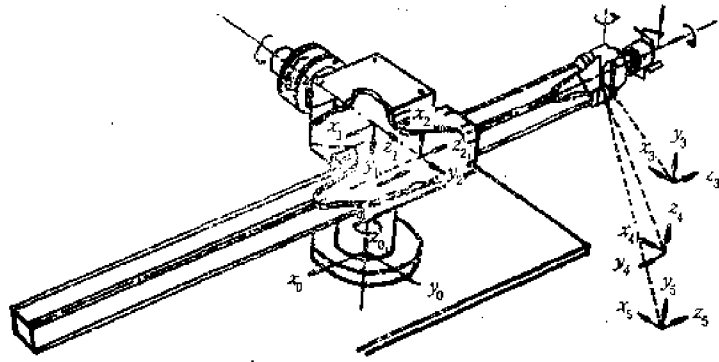


图2-66 斯坦福机械手简图

实际上使机械手运动时，求力矩的计算只是计算工作的一部分，此外还有其它控制的演算，如把此计算时间也包括在内，在100Hz 采样周期内完成所有这些计算还是比较困难的。

于是卢赫等人又提出使用多个 Z8000微处理器，组成多处理器系统的并行运算处理的方法。即对几个关节的机械手组成有几个CPU并行处理的系统，各CPU承担各对应关节的运算，它们具有只存储与自身关节有关数据的专用记忆装置。这样每个CPU都是一个专用部分，即实现式(2-128)~(2-138)的一个循环运算。

卢赫等人所强调的并行处理，其关键是调度程序。他们把式(2-128)~(2-138)分解成18个子程序，虽然研究了各子程序前后的关系，但并没有说明如何最佳地把它分给各CPU，另外也没有指出缩短时间的效果。对个别机械手导出最优化的方程是个非常重要的问题。

四 今后的发展趋势

机械手控制问题是非常复杂而且是较难的，这样大量的计算必须由计算机来进行，但又不能使用大型计算机，主要还是使用微机。值得庆幸的是近几年微机已使浮动小数点的运算硬件化了，又出现了便于计算矩阵的高性能微机。由于现在大规模集成电路技术的飞快发展，高性能微处理器的价格也便宜了。

如果各CPU间的信息传递能很好进行时，用复数个信息处理器是一个非常好的方法。另外，各关节都配备一个处理器，在缩短运算时间上是否就是最合适的问题，还有待今后更进一步研究。

机械手的必要运算不只是从式(2-8)中求出力矩，此外还要读入角度和角速度数值，对各轴所加力矩的检测数值也要读入，与此同时还附带很多计算工作量，这些计算与其它关节还应该是独立而局部地进行。

由上述观点出发，卢赫等人提出的方法也可能成为机械手控制的一个有前途的方向之一。

§ 2-13 机器人手部举例

一 前言

机器人的手部（也叫做手或夹头）是个既古老又新颖的问题。在研究机器人的同时，也研究了提高其手部机能的问题。到现在为止，已经研制了各种机器人的手部，最简单的手部只是在结构上把对象物夹住，此外还有附带简单认识传感器的，如触觉或压觉的传感器，多手指有通用机能的以及焊接用或插孔用的特殊用途手部等。下面仅就最近国际会议上发表的有关机器人手部的几个研究成果加以简单介绍。

二 抓取农产品的多手指夹头

意大利保罗尼亚大学的聂罗兹(Nerozzi)与瓦素拉(Vassura)进行了多手指手部的研究，其最终目标是研究出能把任意形状的对象物，如柔软易破的东西抓住，并且不会造成损伤的手部。作为具体的抓取对象如梨或桃等水果，大头菜或莴苣等蔬菜。此外还有能适合于形状复杂的多种形式对象物的抓取，这时都要求不伤害物体表面并能以必要的最小接触压力抓取对象物。以此为目的东京工业大学的广濑与梅谷等人研究出了“软夹头”，可用于自动选果机等处，但其高速响应性还不理想。

保罗尼亚大学的多指夹头（叫做 M. I. P2型）是由细的弹性棒构成的，左右各10根，共计是20根。其想法是由两侧的20根手指把对象物象笼子似地包起来而实现抓取的把持机构（见图2-67）。

一般的手部是利用手内侧的摩擦力把持对象物的，但是对于水果或某种蔬菜近似于球形的物体，有时因为手部内侧接触部分的压力过高可能导致物体表面或内部受伤。

这时，与夹紧相比，使用笼子式的手部轻轻地把物体“棒住”一样来抓取是一个好的解决办法，而M. I. P2型就是这样的理想夹头。

曾是M. I. P2型原始型式的M. I. P1型是有12根手指的气压驱动方式，但是由于气压驱动与机械部分存在一定问题，经过改进之后才研制出了M. I. P2型。

三 多手指夹头的把持动作

图2-67是M. I. P2型由相对2组4根手指夹紧的基本动作示意图。各组的手指是可以弹性变形的，由驱动环 r 到手指环 f 的摩擦力来传递力矩。此摩擦力矩的变化是由夹紧

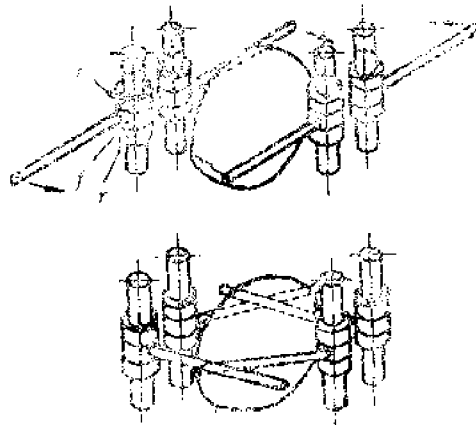


图2-67 用M. I. P2型夹头的抓取基本动作

手指环 f 的两个驱动环 r 产生的压紧力来实现的,此压紧力是由轴向方向上加力的大小而增加和减小的。

指环是在对象物产生的阻力达到某一数值以上时与驱动环间产生滑动。因此,当驱动轴一开始转动时,各手指就向位于中间的对象物方向旋转,当驱动力与对象物产生的阻力与摩擦力相等时停止转动。各环与手指的惯性力是非常小的,并且运动较慢,所以手指碰在对象物上时,给对象物的力是非常微小而且是软的。

手指与对象物接触之后,驱动轴停止转动,但是由于轴向方向的压紧力急剧增大,就可继续维持“保持”的状态。而手指的弹性也对此把持动作的保持起作用。

四 多手指夹头的结构

图2-68是多手指夹头的结构图。

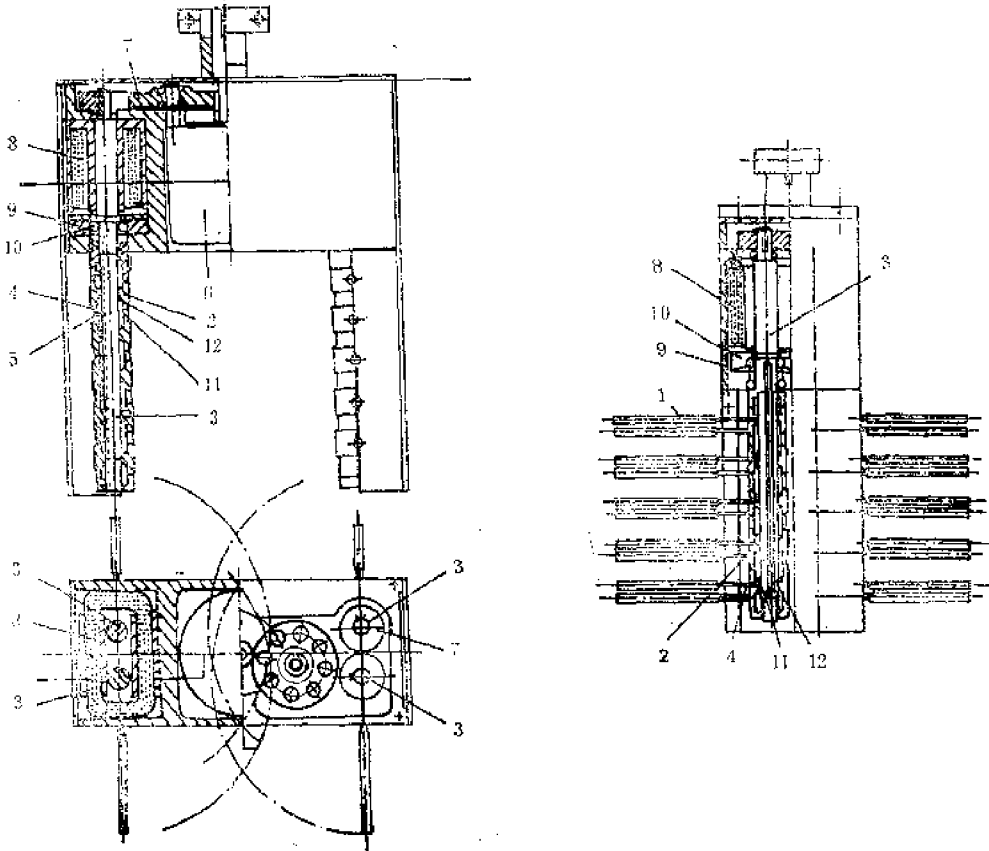


图2-68 M.I.P2型多手指夹头的结构

此图是有20根手指1与手指环2装在驱动旋转轴的外侧。轴的旋转是通过夹头本体上部的步进马达6与齿轮传动实现的,此旋转力矩是由销子5传给驱动环4。

轴向压紧力是由磁铁8加到移动片9上,通过滑动轴承9传给旋转轴。压紧力的变化由调节加在磁铁上的电流来实现。

在压紧力小的状态下,驱动环4与指环2不直接接触,只作用有对中间O形环压紧而产生的摩擦力。只有把O形环充分地压缩后2与4才直接接触。

如需要柔软的把持动作时，以微弱压紧力驱动的手指与对象物接触之后，使马达停转，随着磁铁中电流的急剧增加而加大压紧力，从而使手指固定，这时就变成约束状态了。

各手指的最终把持位置是通过红外线反射式传感器来检测各手指的旋转角度（图2-69）。由此可知道被把持对象物的概略形状。图2-70就是此夹头的参数。

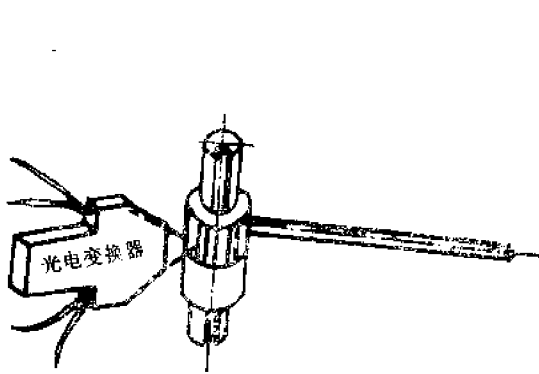
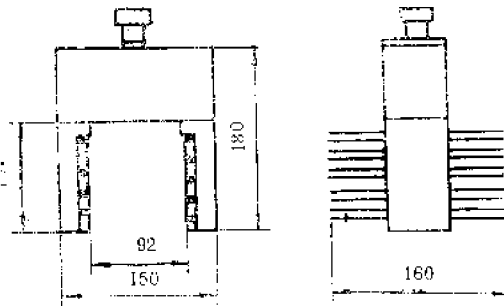


图2-69 手指旋转角的检测法



重量40 N, 手指数2, 手指旋转角 135° , 磁铁最大电流0.8 A,
最大负载160 N, 步进马达电流: 电源28 V DC,
型式: 2相, 单极驱动保持力矩0.54 N·m

图2-70 多指夹头参数

五 多指夹头的抓取实验

对已知尺寸与表面状态的圆锥、球、圆柱及角柱等对象物的抓取能力进行了实验。抓取的稳定性是当对象物位于手指动作范围中央时最好，而离开中央位置时是不好的。见图2-71(a)、(b)。

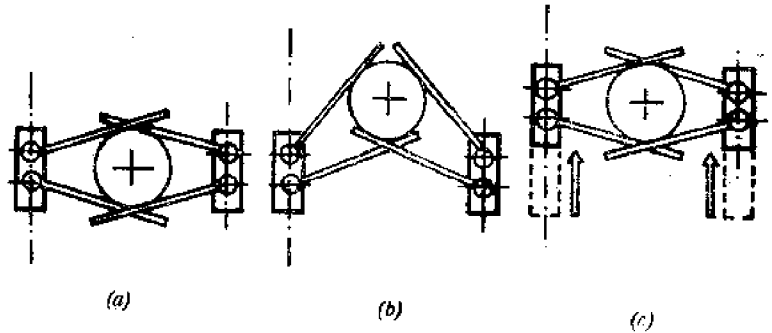


图2-71 把持位置不同的稳定性

由于对象物多数是放在桌子或平台上，在实现柔软的抓取时，由手指产生的力不能克服对象物与平台间的摩擦力，对象物在原位不动，因此成为上述的不稳定状态。

这时，利用图2-69所示检测手指旋转角的机能，使之离开对象物，移动到最佳位置后再重新抓取的方法是有效的（图2-71(c)）。

另外还进行了梨的抓取实验，证明了梨的初放位置不同也可很好地抓取。

六 安装用夹头的成本计算

如果用机器人进行装配等复杂作业时，被抓取对象物的形状与尺寸是多变的。这时

经常是根据对象物的种类和要进行的作业来变换机器人的手部，即交换夹头的方法近年来逐渐开始采用了。

但是，交换夹头时增加了交换时间，从而也增加了制造成本。因此希望用一种夹头能完成多种工作。但是到目前为止，能够承受工厂内的作业环境且通用性强的夹头还没有很好制造出来。

瑞典马尔滕逊 (Martensson) 和约翰逊 (Johansson) 对装配用夹头的多机能性与交换性的成本关系进行了多方的论证。

首先，为了满足装配系统的必要基本特性必须考虑以下的要求：

- (1) 作业时间短
- (2) 精度高
- (3) 可以装配过渡配合的零件
- (4) 可以适应装配零件形状与尺寸的变化。

另外在装配系统中使用机器人时，还需要以下的特性：

- (1) 机器人：安装、交换时间短，易于变更程序。
- (2) 夹头：夹头的交换次数少，短时间内可以重新调整。
- (3) 适应性：可按外界环境调节装配动作。
- (4) 供给零件：有一定空间的料库，短时间可进行调整。
- (5) 经济性：整个装配系统的成本要低。

当然，除了上述要求外还有很多必要条件，在此就不详细介绍了。

七 各种装配用夹头

在装配系统中，为了实现多种零件的操作，自然夹头的机能必须是多样的。同时交换夹头的时间应尽量短。在这样有多种机能的夹头中，有通用夹头、柔性夹头、多机能夹头及特殊夹头等。

所谓通用夹头是指与人手一样的夹头，但是这样的产品将来也不会出现。假肢中的假手是与此通用夹头接近的，但是用于工业，从其可靠性与给出力的大小来看是不合适的。

柔性夹头是指在对象物的装配作业范围内，根据作业情况可以变化机能的夹头。如能抓取各种直径圆形物体的夹头就属于这种。

多机能夹头是在一个夹头内有必要的多种功能，如图2-72所示即为其中一种。

特殊夹头是各种工业用机器人中常见的特殊用途手指，在此就不多讲了。

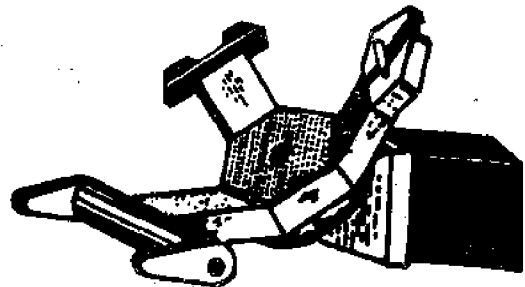


图2-72 多机能夹头

八 夹头的经济性

装配线的装设和维护的必要成本是由

以下各项组成的:

- (1) 工业机器人所需设备的成本,
- (2) 辅助设备的成本,
- (3) 工资、维修费及其它费用。

当然, 这些因素与被装配产品的种类、使用设备的复杂程度有关, 在成本计算时应该考虑的各部分的成本是可以估算的, 所以按下式可求出平均生产成本 K_a :

$$K_a = (T_{i, i_a} / h) K_{I_a} + K_i + K_0(s + hq(1 - c) + Kbt_i q K_0$$

式中 $K_{I_a} = K_B + K_g(k_g + 1) + k(K_a + K_i)$,

$$K_B = K_r + K_d + K_p$$

b : 不合格零件的比例 (%)

c : 装配系统的平均使用率 (%)

h : 全装配系统可用时间 (小时)

k : 装配产品的使用零件数 (个)

k_g : 交换夹头需要的零件数 (个)

q : 需要维护的人数

s : 运转时间 (小时)

t_i : 由废品造成的间隙时间 (小时)

K_a : 装配所需平均生产成本 (元)

K_d : 传感器或测量仪器的成本 (元)

K_i : 供给装置所需成本 (每个零件) (元)

K_g : 不同夹头种类所需成本 (元)

K_r : 租赁费及管理费 (元)

K_p : 保管费 (元)

K_0 : 维修人员及操作者的工资 (元)

K_p : 规划成本 (元)

K_r : 购买机器人费用 (元)

T_{i, i_a} : 每件产品装配所用时间 (小时)

由计算可看出, 用种类少的夹头处理多种类零件时其成本可降低。因此, 设计复杂的多机能夹头即使是费时间, 其结果还是便宜的。

九 夹头的适应性

所谓夹头的适应性, 如上所述, 是对用外部信号能够适合实际条件动作的夹头机能而言的。在适应性中可分为主动适应性与被动适应性两种。

主动适应系统是指力检测型的, 装配动作是按检测力的作用与反作用而进行的。零件的相对位置是通过检测力的传感器输出信号而求得。这样的系统, 具有适用于各种装配线多种零件的通用性, 但是其缺点是成本高, 其响应时间也较长。

与此相反，利用柔性原理组成的被动适应技术，在技术性方面与在经济性方面都比较有吸引力。其缺点是零件孔的插入端需要有超过装置误差大小的锥形倒角。但是为了使响应加快，装配时间很小就可完成，对过渡配合或紧配合都适用。

另外，柔性适应系统所需成本比较低，它只相当于装配用机器人价格的2%，但主动型适应系统则相当于10%左右。

第三章 移动机能与行走控制

§ 3-1 移动机能的重要性与分类

一般，人们头脑中的机器人是由眼、手、脚、头及躯干等5部分构成的机械。眼是广义的传感器，手是机械手，脚是移动部分。此移动部分使机器人或自动机的活动范围扩大了，可以说它是使其性能发生了飞跃性提高的重要组成部分。

最近，对移动式机器人的关心程度日益提高。其第一个原因是各工业领域对可移动机器人的要求越来越高。例如，原子能电站的维护作业，现在基本上是由人工来完成，但是却存在着操作者安全的严重问题。所以对移动式机器人技术的期望是相当迫切的。

除了原子能工业以外，象救灾机器人、爆炸物处理机器人、炉前作业机器人以及各种检查、探险机器人等，它们可进入因危险人们不能进入的作业场所，对这样机器人的需求也是很迫切的。

第二个原因是对生产线上无人搬运车的要求日益迫切。

移动方式很多，但是大致可分为车轮行走方式与多足步行方式两种。这两种方式各有各的优缺点，车轮行走方式其大部分技术已经成熟，控制也比较容易，但是其缺点是应用场地有所限制。而多足步行方式对移动场地的适应性非常好，但其最大的困难是控制问题，如果是两足步行，则其稳定性是个难题。

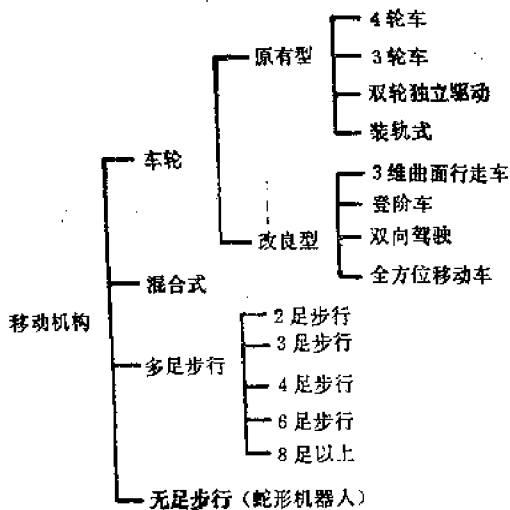


图3-1 机器人移动机构的分类

图3-1是现代机器人或自动机等移动部分所用的机构，或正在研制中的机构的大致分类情况。

到目前为止，已研制了很多形式的步行机械，但是在现场还没有达到实用化的程度。

关于车轮式移动机械的研究可以分成如下两类，一种是在以前的车辆中装上独特的传感器以实现移动机能的，另一种是按某种目的特别设计的车辆机构，以此实现各种移动机能。

此外还有稍加变化的移动机构，既有车轮又有脚的混合型机构。

§ 3-2 移动机器人的路径引导方式

在工厂内频繁移动的机器人或无人搬运车的引导方式，多数是采用如图3-2(a)、(b)所示的电磁引导方式。由于这种方法在无人车的引导中也是用得最多的，所以其技术是比较成熟的。

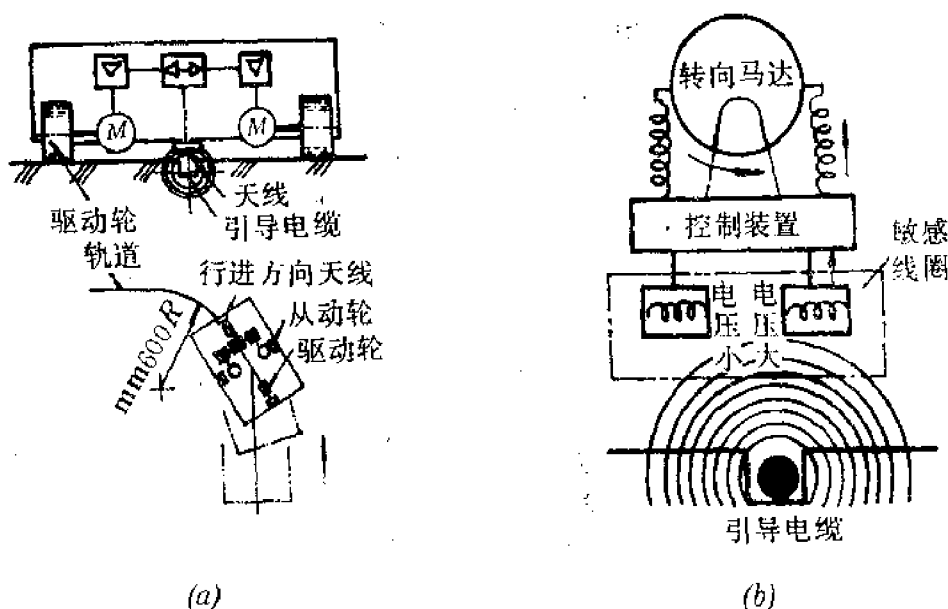


图3-2 引导电缆的转向方式

首先在地板上开出深度为1cm左右的沟，在其中埋入导线。如在此导线中流过数千周的电则导线周围就产生磁场。此磁场是通过两个磁传感器来检测。根据两个磁传感器检测出来的磁场强弱的差值产生转向角，以此独立地调节移动机器人本体两侧的驱动速度。以上是用引导电缆的引导方式工作的原理。按这种方式，沿移动路径有一条导线就足够了。但是，实际上为了防止各移动车辆的相互碰撞和在停车站的位置核实等常常需要埋设几根电缆。

另外，移动机器人与控制用计算机间信息传递一般是很困难的，但据说最近瑞典的某工厂把信号搭载在此引导电缆上的作法已经实用化了。如确实是这样，将使移动机器人的控制变得简单易行了。除了引导电缆之外，还有用反射纸带程序与光电传感器的引导方式已经实用化了。其它方式还有用紫外线和激光的，用工业电视等研究正在进行。

§ 3-3 移动机器人的传感器

移动机器人是有智能的机械。为了使此智能移动机械发挥出希望的作业能力，需要有各种传感器的帮助。通过这些传感器，移动机器人可以认识外部环境和周围的环境，然后作出适当的判断而完成有目的的作业。

一般动物用于移动的传感器，其视觉是起最重要的作用。但是视觉作用不充分的动

物或夜间活动的动物，使用其它机能或与视觉并用。蝙蝠的超声波、蚂蚁等昆虫的部分触觉与嗅觉，鼯鼠等的嗅觉就是其典型的例子。

对移动机器人而言，视觉是最有力的手段。但是，目前的视觉信息认识技术作为移动机器人的眼目，无论是硬件还是软件都仍不够理想。若真正作到象一般的动物那样，把景象认识机能给予视觉传感器，只用由此得到的视觉信息进行移动作业，其未解决的问题还是很多的。

一 自己认识位置方向的传感器

自己认识位置方向的传感器（以下简称位置方向传感器）是为了在移动平面上检测移动机器人二维的位置与方向（姿态角）的传感器。此位置方向传感器可以说是移动机器人所特有的传感器。即一般固定式机器人其手部的三维的位置或方向可通过设在关节处的旋转角传感器来检测，并通过计算很容易求出来。但是不在引导路线上移动的机器人，好象是断线的风筝一样要在地面上乱走，所以移动机器人必须知道：

(1) 自己处于平面内的什么位置上，并正在朝向哪个方向。

(2) 在把移动机器人作为控制对象之一的系统中，此移动机器人处于平面内的什么位置上，并朝向哪个方向。

对于(1)的情况是在机器人本体上必须装设传感器，对于(2)的情况，必须在移动机器人的作业空间内某一适当的地方装设检测移动机器人运动的传感器。所以在此根据移动机器人传感器的概念出发，只对(1)的情况进行讨论。

由于实现相当于动物眼睛一样的传感器是很困难的，象某些动物一样，在移动机器人中也不只靠视觉传感器，此外还并用其它传感器而保证其移动机能。

移动机器人的传感器大体上可分为以下4种：

(1) 路径引导传感器：电磁传感器等。

(2) 认识自己位置与方向的传感器：陀螺仪、距离传感器、位置检测传感器等。

(3) 环境与对象物认识传感器：视觉、听觉、触觉传感器等。

(4) 自己状态认识传感器（内部传感器）：腿关节角度传感器、车轮旋转角度传感器、脚掌传感器、转向角度传感器等。

关于(1)的路径引导传感器在上节中已介绍了，在下面以(2)的认识自己位置与方向的传感器为中心，介绍移动机器人中实际应用的例子。

二 光学位置方向传感器

最初的移动机器人用位置方向传感器是日本东芝的安倍等人研究的机器人两轮车。它是将以水银灯组成的三个光源设在室内的三个地方，对它们分别以不同的频率进行调频，它们发出的光由装在移动机器人上的受光器所接收。因为受光器是一个，接收的是三个光源的光，所以如图3-3所示，使倾斜45°角的反射镜旋转而通过透镜聚光。分辨出由光源来的水银灯光的频率之后，分别求出其入射角度，通过此角度用三角测量的原理给出自己的位置与方向（图3-4）。

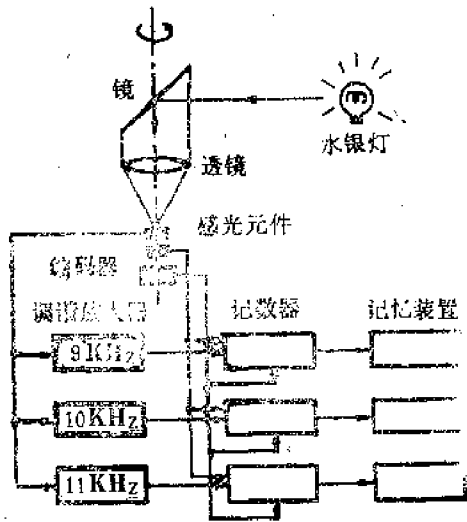


图3-3 透镜与感光元件组成的位置方向传感器

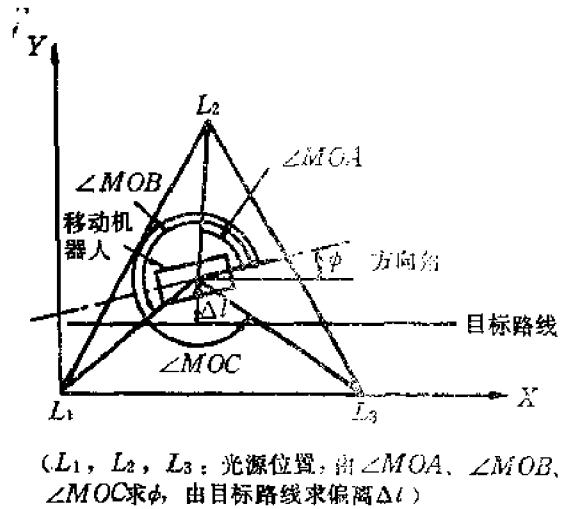
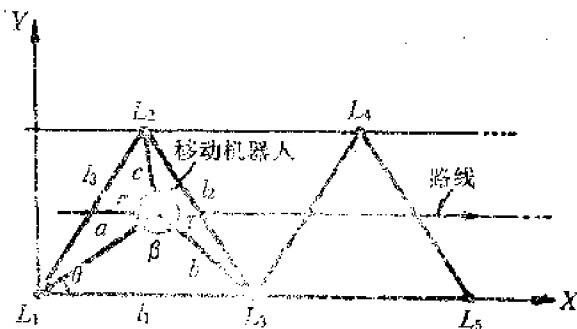


图3-4 用三角测量法检测位置方向

如采用此方法, 即使是在细长的走廊中引导路径, 只要增加光源就可以了(图3-5)。

但是这种方法的最大缺点是受光元件只有一个, 必须在同时同地点能看到三个光源。即使是检测一个光源之后求出其角度, 在求出下一个光源的角度之前, 随着机器人本体的移动传感器的位置与方向已经改变了。因此在行走中用计算方法不能正确地算出自己的位置与方向。而东芝在使用上述方法的同时, 又在移动机器人上装设了光源, 它通过在墙壁上固定的二个光学传感器试图求出机器人的位置与方向(图3-6)。这相当



($L_1 \sim L_5$: 光源位置, α, β, r : 测定值(参照图3-4), 由此求 a, b, c)

图3-5 长距离的引导

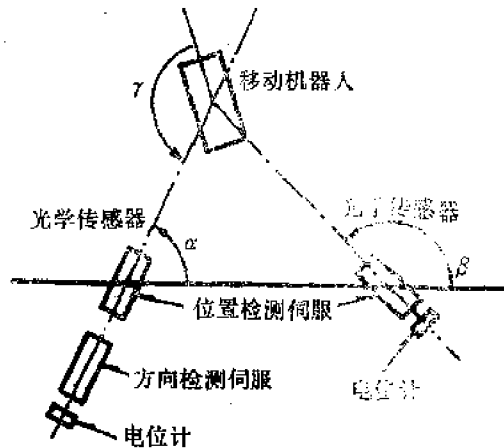


图3-6 用固定在墙壁上的两个传感器检测位置与方向

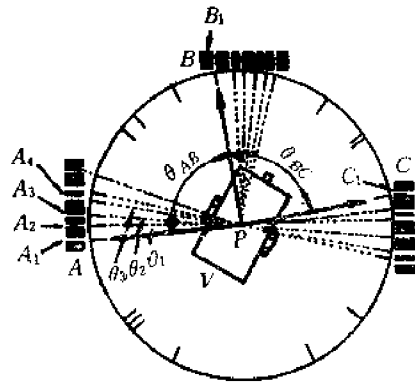
于前面介绍的第(2)种情况。

三 用工业电视的位置方向传感器

日本机械技术研究所的中村研究了用工业电视和上述的三角测量原理进行位置检测的方法。这是用工业电视检测在壁面上装设有已知的三个狭缝图形, 测出其角度后得出

自己位置与方向的方法。

图3-7是表示其狭缝图形的例子。以A、B、C三个地方狭缝的各个最左端为基准，其各个狭缝图形是由垂直装设在机器人上的旋转潜望镜式结构的工业电视来检测，按其角度计算位置与方向（图3-8）。在一边为7 m的三角形顶点上放置狭缝图形时，这种方法所测得的位置精度为1cm。



(由 $\theta_1 - \theta_3$ 确定壁面图形A, B, C,
由 θ_{AB}, θ_{BC} 可知移动车的位置P与方向)

图3-7 用工业电视识别移动机器人的位置与方向

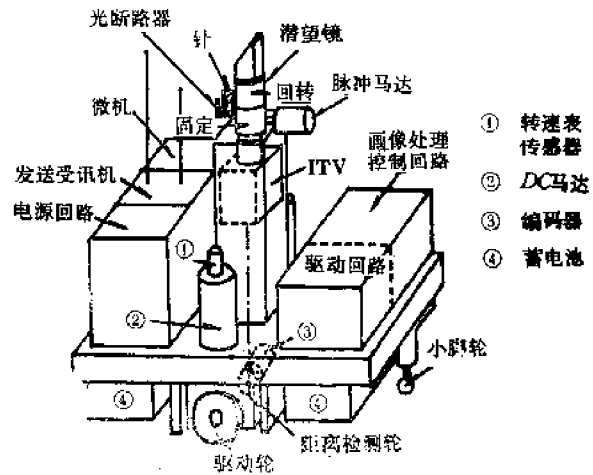


图3-8 移动机器人的结构

在这种方法中，由于其视觉传感器只有一台设在中央的工业电视摄像机，必须是用旋转反射镜与光轴成 90° 角而集光的方法。因此，随着车体的移动，光轴的位置沿狭缝图形移动，因此输入角度的数值要产生偏差。

防止这种误差的方法，是与装在车轮上的距离传感器协调后进行路径控制的方法（图3-9）。但是由于装在车轮上的距离传感器对误差进行积累，必须在停止时进行校正位置方向的测定。

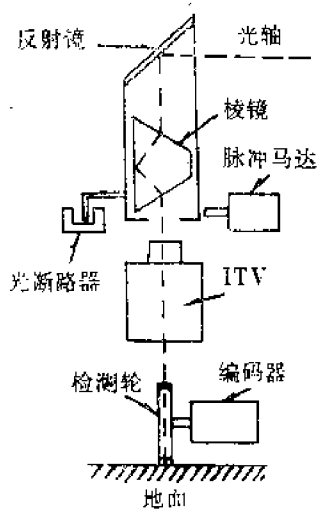


图3-9 用工业电视与移动距离求位置与方向的方法

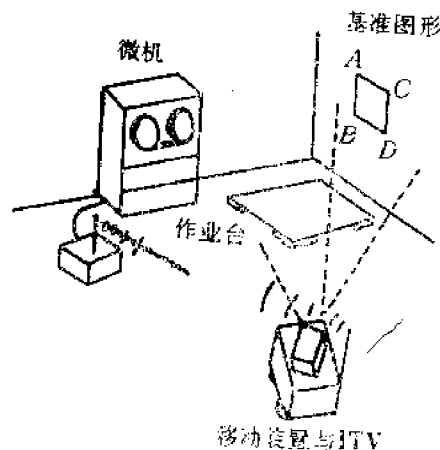


图3-10 用基准图形检测位置方向的方法

另外，如用工业电视时，即使不读壁面上的三个狭缝图形，由一个基准图形也可在某种程度上求得自己的位置与方向（图3-10）。但是用这种方法其误差一定是大的。

该研究所的高野又进一步研究了通过工业电视识别地面上图形来计算位置与方向的方法。即在路面上设有如图3-11所示的各种图形记号，它是对机器人移动有意义的。这是这种方法的最大特点，记号不是图形时也可作为推算自己的位置与方向时使用。

图形编号	形状	面积比	机能	图形编号	形状	面积比	机能
1		4	直进 (A.P)	72		6	交叉点 一时停止
2		1	直进 (P)	8		2	一时停止 (P)
3		8	交叉点 左转	9		6	(A.P) 目的地 (T)
4		7	交叉点 右转	9'		1	(P)
5		7	交叉点 直进	91		5	(A.P) 目的地 (E)
8		3	交叉点 虚设	91'		2	(P)
7		4	交叉点 一时停止	92		3	(A.P) 目的地 (E.T)
71		5	交叉点 一时停止	92'		4	(P)

A.P. 修正姿势角与位置, T: 一定时间后开始,
E.T, 外部起动开关并一定时间后起动 P: 修正位置,
E: 由外部起动开关起动

图3-11 路面记号形状与大小

如图3-12所示，记号为三角形时，在工业电视上显示出的三角形记号只倾斜某一角度。如果能计算此角度 θ 时，就可知道自己的方向了。

但是，为了求出此倾角 θ 并不是件容易的事。这时，作为路面记号认识法，使用如图3-13所示的投影法。

由此投影图求出 A_x 与 A_p 之后计算其比值：

$$Q = A_p / A_x \quad (3-1)$$

由于记号的形状是等边三角形，对于倾角如图3-14所示，Q值可取某一数值，反过来就可按下式求得 θ 了：

$$\theta = \tan\{(1 - 2Q)\tan\alpha\} \quad (3-2)$$

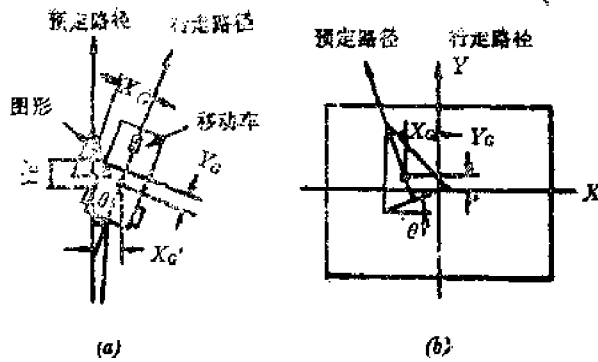


图3-12 移动车与摄像机图像的关系

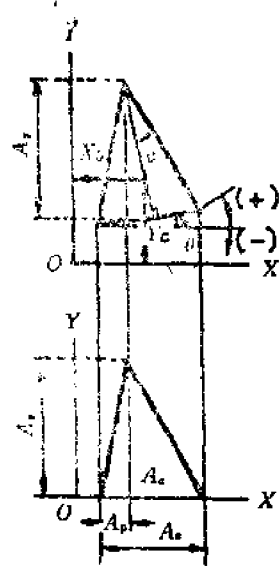


图3-13 提取记号的特征

式中 2α 是等腰三角形记号的顶角。

而位置的测定是按3-12所示，通过计算出记号重心位置来求得。但是这种方法，在求出图形的倾角 θ 之前，首先必须对图形的形状加以识别和分类。高野的方法提出了形状固有值的数值。

在图3-13中，由投影图 X 方向的最大宽度 A_x 与 Y 方向的最大宽度 A_y ，以及面积 A_s ，可按下列式求出形状固有值 S ：

$$S = \frac{A_s}{A_x \cdot A_y} \quad (0 < S \leq 1) \quad (3-3)$$

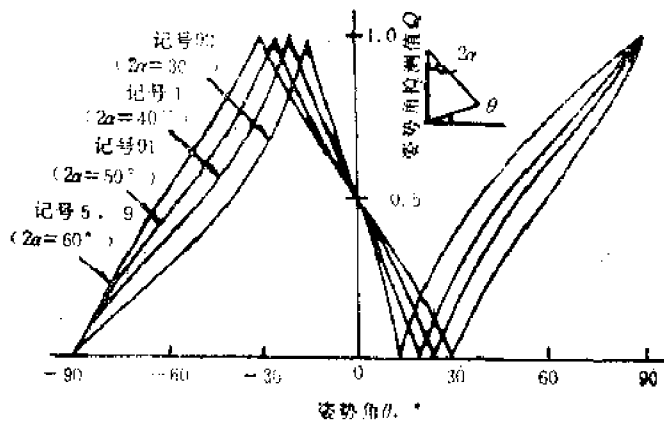


图3-14 姿势角检测值的特性

图3-15是表示圆环形与长方形时的 A_x 、 A_y 、 A_s 图形。此形状固有值 S 是相对前面的倾角 θ 取某一数值。圆形与圆环形时的 S 是相对 θ 取常数值，三角形与长方形是按一定的分布曲线而定（图3-16）。因此，用 S 与 θ 可以辨识记号的形状。

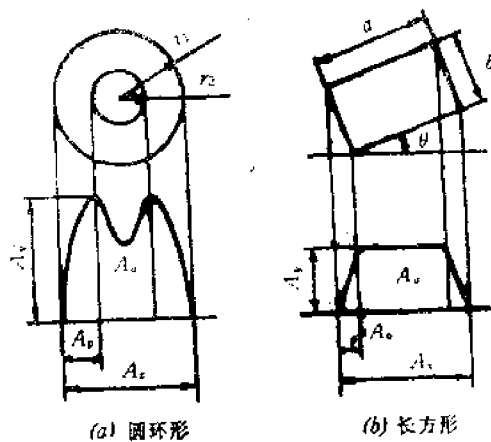


图3-15 圆环与长方形投影图形固有值计算法

另外，记号的面积 A_0 可以用简单的计算求得，所以用记号的面积，即记号的大小，可把某一形状与其它形状分开时，就可缩短推算的时间。

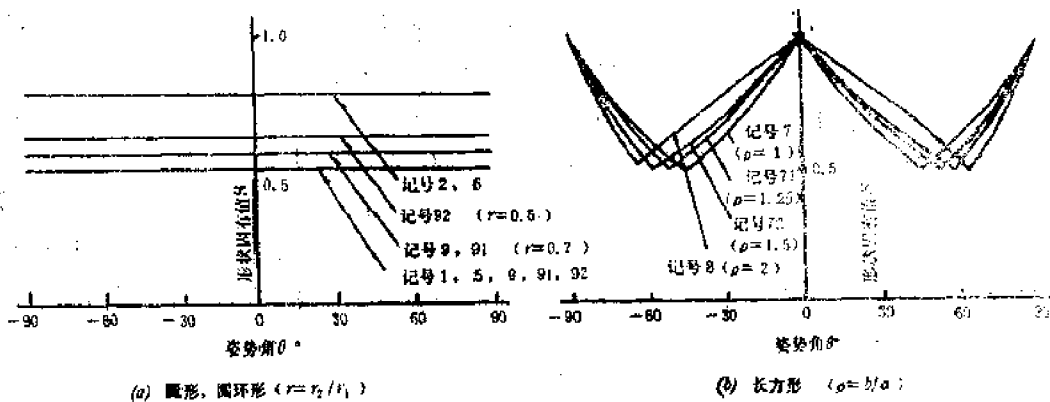


图3-16 形状固有值的特性

四 超声波传感器

日本筑波大学的金山和油田，电气通讯大学的饭岛等人研制了叫做“山彦”的各种形式的自动移动机器人，其中“山彦3.1号”是有超声波的眼睛，用以对墙壁进行识别，用它作为辅助的移动信息。

在机器人顶部的旋转轴上，装有上下一对的超声波发送接收器，它们是以 90° 的间隔朝向四个方向。图3-17是山彦3.1号一边看着左面而沿着凹凸不平的壁面前进时，用超声波眼睛所观测到的壁面形状。山彦3.1号，在到达如图所示的壁以前，经过测定距离的某一区间后充分接近直线时就可判断出是沿着平壁，识别出到壁之前的距离与自己相对壁的倾角。即用这种方法可以知道距壁的距离和自己与壁间的角度。

直线度是对测得的数据用最小平方方法进行直线的拟合，以其误差的大小来判断。在图3-17中，用下部的点X表示的部分是越过阶梯状拐角之后的误差分布情况，如果此值超过某一界限就可判断出不是直线壁。

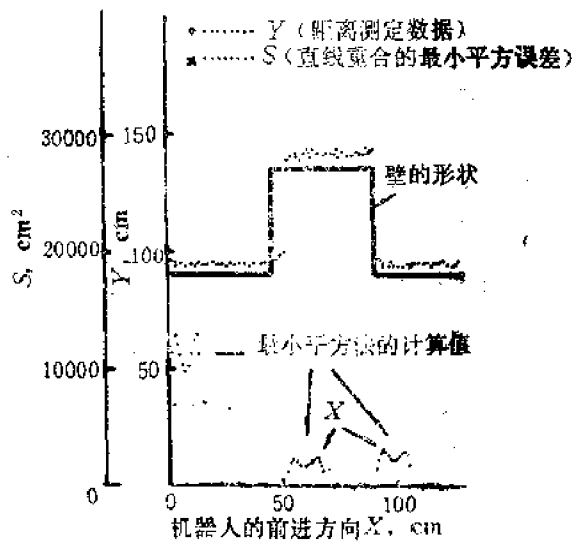


图3-17 山彦号对壁的认识

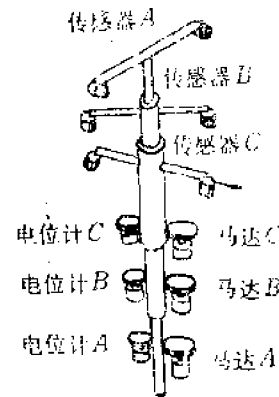


图3-18 超声波位置方向传感器“旋律”的结构图

在机械技术研究所研制的全方向移动车中装有超声波位置方向传感器。

图3-18 是此超声波传感器旋转机构的简图。传感器是由左右对称的超声波元件组成，此3组传感器是同轴而独立旋转的机构。因此，如能测得其旋转角，则可“同时地”测得相对传感器的发讯源方向。这种传感器的最大特点是可以同时检测。另外，用前面图3-4与图3-6介绍的三角测量原理的方法，都是受光部分只有一个，所以它们不能同时检测。即在移动中不能正确地检测三点。而图3-18的方式可去掉此缺点。

同轴上的三个超声波受讯装置是由分别左右一对的受波元件组成，这时受波器是一个经常朝向发出某一频率超声波的发讯器方向的伺服系统。图3-19是此伺服回路的方块图。

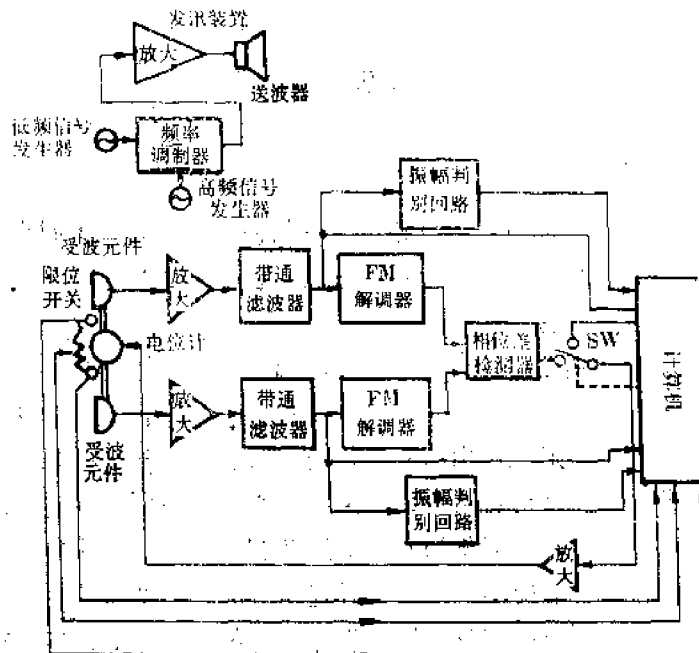


图3-19 超声波位置方向传感器“旋律”的伺服方块图

这样的传感器，它们在初始状态不能朝向发讯源的方向，所以在开始时必须进行传感器对准发讯源的探索动作。

超声波传感器的问题之一是存在因壁反射而造成的叠波和噪声。另外它与光不同，有指向性，由于角度不同，其受讯程度要变化。如果注意这点，它还是一种很好的小型传感器。

§ 3-4 动物的行走

一 自己控制行走的自动机

托莫维奇(Tomovic)把不用车轮的方法称为自己控制行走的自动机，认为它应具有如下的特点：

- (1) 与地面摩擦系数无关的运动，
- (2) 可以登上 90° 以内的任意斜坡，
- (3) 无倾倒的危险，
- (4) 对地面的压力最小，
- (5) 对凹凸的地面可以适应。

自控自动机是由机械的移动元件群与决定其状态的电气回路元件群组成。

1. 移动元件

“关节形”移动元件的轨迹如图3-20所示。

不规整的关节也可变换成普通的长方体。车轮移动机械的情况，关节移动只是距离时，其轨迹 oo' 是与地面平行的直线。而自控移动时其轨迹 oo' 上面是上凸曲线的集合，不包括直线或与地面平行的线。这样的轨迹 oo' 是连续曲线的集合，这一点说明可以得到最优控制问题。

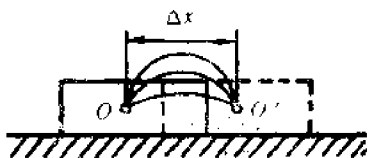


图 3-20 自控自动机移动元件的轨迹

图3-20只是表示与移动机构无关的关节移动轨迹。移动机构的问题是可以各种方法加以解决的，但在此不对它进行讨论。

由于是沿凸曲线进行的移动，在自控移动自动机中，移动力经常是必须与地面成某一角度作用着。这样的移动力作用方式虽然在平面上运动时招致效率的降低，但是它不受地面摩擦系数的影响，是对坏的道路或道路外的移动中不可缺少的条件。

另一个重要特征是自控自动机移动元件的运动是间歇的。在曲线 oo' 的端点，关节与地面有接触，其中间各点是处在空中的。因此，在自控自动机中两个状态（与地面接触状态与离开地面状态）交替进行。对于车轮移动装置这一交替状态是不存在的，这就是车轮移动的优缺点所在。因为自控的移动是两种状态交替反复进行的，所以有脉动特性存在。图3-21是表示力 P_v 与 P_n 的情况。在车轮移动中，力 P_v 为常值且平行于地面，而自控自动机则力 P_v 与地面成一 α 角，说明它具有随时间变化为不连续的离散特性（图3-22）。与地面接触时，在某一时间内关节必须是静止不动的，否则就要因摩擦而产生

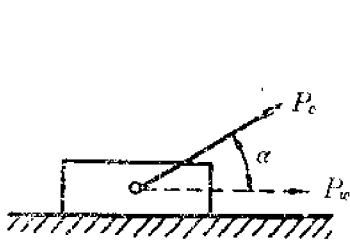
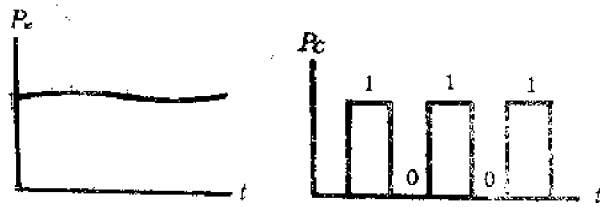


图3-21 自控自动机的移动力的作用方向



(a) 车轮

(b) 自控自动机

图3-22 移动力的时间变化曲线

运动。同样，关节也不能长时间处在空中，不然这时就变成飞行状态了。

由于力 P_c 的脉动特性，可以用二进制系统表示移动元件。把不与地面接触的状态定为1，在地面上静止的状态定为0。

这样自控移动自动机的移动元件可象图3-23那样，用非常简单抽象的形式来加以描述。图中，关节可用有两个离散状态的长方体表示。力 P_c 加入的角度 α 是运动的一般参数，但不是各个关节的特性。结论是关节可用二进制元件（二进制系统）来描述，这是有限状态自动机的基础。

把关节运动机构加以改造之后，使其保持车轮移动的优点并可使效率提高。沿着曲线轨迹的运动，即关节周期地离开地面的运动，需要使移动物体沿与轨迹垂直方向上有加速度，所以要消耗能量。因此，有必要在抑制垂直位移能量消耗下进行改造。这就必须使关节结构更加复杂才能实现。

如果把关节分成沿直线轨迹运动的大质量与同地面接触和脱离的小质量两部分时，可以得到沿两个轨迹移动的元件（图3-24）。大部分的质量 M 是沿与地面平行的轨迹运

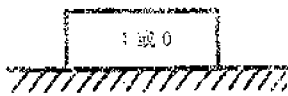


图3-23 用二进制数表示关节的图式

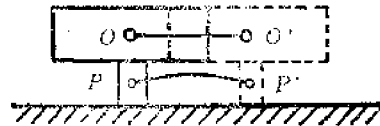


图3-24 腿形移动元件

动，只有小部分质量 m 沿曲线 PP' 运动。因此减少交替加速的损失为 m/M 。

因质量 m 是沿曲线运动的，所以关节的结构就完全确定了。即移动元件必须交替地上下运动。这时质量 m 可分成两部分，在点 a 与点 b 必须引入旋转运动（图3-25）。把这样的自控自动机的移动元件叫做腿。

与关节的情况一样，腿的两个动作状态可用两个记号表示。1表示腿由地面上抬起，0表示与地面接触。表示自控移动机特性的第一个阶段，腿的详细形状、长度、厚度等并不重要，而采用如图3-26所示腿的简化表示法。



图3-25 腿的结构



图3-26 二进制腿的图示法

在此介绍的机械元件（关节形、腿形）是可以充分表现所有自控自动机特性的。复杂的自动机是由实现协调运动的很多元件构成的。自控自动机至少具有关节形或腿形移动元件两种。

2. 自行走自动机的电气回路

为了对自动机整个状态进行定义，必须确定对移动元件作用的控制信号。因控制信号的形式是由作用力的脉动特性来决定的，所以变成了离散的（图3-22(b)）。因为自控自动机是由几个移动元件组成的，所以也需要相应数量的控制信号（电脉冲）。

一般自控自动机的控制信号有如下的特性：

- (1) 控制信号数与移动元件数相等。
- (2) 控制信号具有离散特性。
- (3) 有周期性。

作为简单的例子，研究有三个关节的自控自动机。在第一个循环中间1关节只前进 Δx 。在第二个循环中间，第2关节运动，然后第三关节继续运动。此后再重复全过程。此三个位移，可用一连串的三个二进制数来表示（图3-27）。

因此，控制信号可以用移位存储器的形式表示（图3-28）。其结果，自控自动机就其结构元件来说是具有1个（或1个以上）移位存储器。为了表现移动方法，有必要在自动机的存储中记入各参数的二进制初始值。为了方便起见可用下式形式表示。

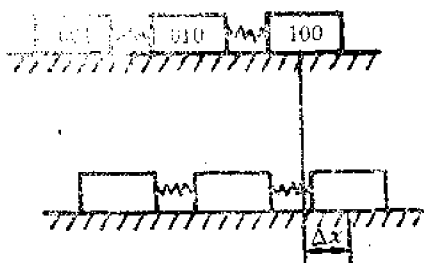


图3-27 三关节自控自动机

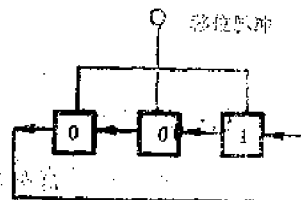


图3-28 控制自动机的移位存储器

$$X_0 = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}, \quad (x_i = 1 \text{ 或 } 0) \quad (3-4)$$

如 X_0 确定时，则向水平面上一个方向的等速度运动也就确定了。

但是为了完全控制自动机，必须有方向、运动形式及速度变化的控制信号，这些是完全另外的特性，不能归入一般的自动控制中。因为这些动作，作为自动控制是依另外的基准而定的。在此，不涉及自动机的非自动控制方法，由上述的移位存储法，即使对复杂的运动，也认为是完全具备必要的能力了。

下面介绍自动移动方法的几个例子。

[例1] 爬行的自动机

图3-29是关节式爬行自动机的移动图式。以2进制表示如下：

$$X_0 = \{0, 0, 0, 0, 1\} \quad (3-5)$$

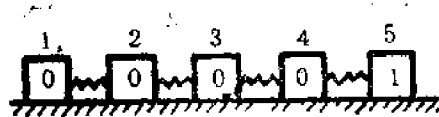


图3-29 爬行自动机的图式

[例2] 4足自动机

考虑有腿形移动元件的自动机(图3-30)。

由于4只脚是对称布置的,所以稳定性好。即使在4个支持点的高度不同时,由于腿的柔软性也可保持其稳定性。这一点在凹凸不平的地面上移动时是非常重要的。

这时二进制式 X_0 取不同的形式。按与4足动物的类比,移位存储器的输入可选如下的形式:

$$X_0 = \{1(2), 0(3), 0(1), 0(4)\} \quad (3-6)$$

括号内的值是表示存储器的初始状态与自动机脚间的关系。此关系如图3-30、图3-31所示。按指定 X_0 式的移动叫“步行”。

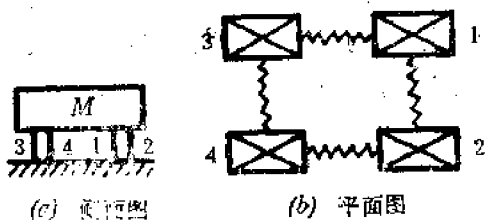


图3-30 4足自动机

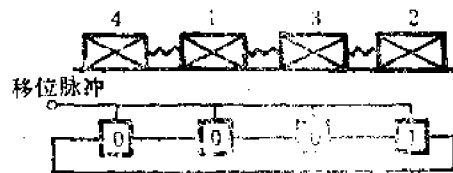


图3-31 自动机的脚与移位存储的结合

二 有限状态的自动机

在1966年托莫维奇与莫奇赫(McGhee)提出了有限状态的理论,试图说明有限状态自动机的数学理论用于对生物工程系统的综合分析是很容易的。由于自动机理论与控制理论是有关的,故引入了下面自动控制执行器的概念。

1. 自动控制执行器

自然生物的腿是由内部相互连接的几个杠杆组成的,由平衡肌肉群来驱动。由于主动肌肉群与平衡肌肉群受到适当的刺激,关节则向两方旋转。另外,关节还可以固定或自由地松弛。在复杂的运动中,一般要引起表3-1所示的全部四种状态。但是实现腿机能的机械系统,至少应该具有可进行这四种状态的能源元件。把这样的能源元件叫做自控执行器。自控执行器如表3-1所示,是由二个2进制输入和一个由输入决定的连续输出所构成的组合(是无记忆的回路元件)。

表3-1 自控执行器的定义

输入	执行器状态	输出
00	0	松弛
01	1	缩小
10	2	伸长
11	3	固定

在生物工程系统中使用的自控执行器是可以在两个固定界限内进行旋转的。以 z 表示执行器的输出, z_0 与 z_1 为 Z 的界限值时,则执行器可达到的点集合 S 可在下述的闭区

间内定义：

$$S = [z_1, z_2] \quad (3-7)$$

在自动机理论中，必须认为自控执行器是理想化的。当执行器为电气机械时，是以带有磁离合器与电制动器两种机能的可逆转马达作为近似的执行器。

为了充分发挥自控执行器的能力，必须有反馈信号。因此，各执行器与第2点的集合相对应。这是决定集合 T ，在 S 中有关执行器状态的信息是被反馈点的集合。一般在连续控制中集合 T 与集合 S 是等价的，但对有限状态控制则 T 是 S 的部分集合。这里的问题在于后者。

T 的元素叫做决定点。在有限控制中通过适当的传感器可作成各决定点。由连续输入给出二进制数很方便，一般的传感器形式是阈值门。阈值门是两个连续输入与一个二进制输出的组合回路元件。一个输入是基准输入，另外的输入叫做信号输入。表3-2表示此动作。因为自控执行器的稳定状态是连续的，所以可准备任意个决定点。以自控执行器为能源元件组成机械时，为了发挥系统的总体机能，一般是需要阈值反馈、二进制记忆或决定元件。把这样的复合体叫做执行器网。

表3-2 阈值门的动作

偏差信号	输出
正	1
0	0
负	0

s =信号输入， r =基准输入， e =偏差输入， $e=s-r$

示此动作。因为自控执行器的稳定状态是连续的，所以可准备任意个决定点。以自控执行器为能源元件组成机械时，为了发挥系统的总体机能，一般是需要阈值反馈、二进制记忆或决定元件。把这样的复合体叫做执行器网。

2. 人工脚

最先把自动机理论用于假肢设计的人是里别尔松(Liberson)，他的装置是用于膝上部截肢者的人工脚，是把控制膝关节固定与放开的开关装在脚后跟上的装置。在使用此假肢时，是假定截肢者的另一条腿和两个肘关节的机能齐全。

下面将要介绍的托莫维奇等人的人工脚也是在上述相同情况下使用的，膝关节与踝关节是被控制的，从加力状态、开放状态及固定状态的意义上说是里别尔松研究的继续。

在设计使膝、踝关节协调运动的有限状态控制装置时，首先必须作出自然脚稳态步行的有限状态模型。为此应用了木勃里格(Muybridge)提出的摄像检测法。

假定被控制的人工脚有膝、踝及脚指三个关节。在膝与踝关节中装有自控执行器。脚指关节是被动的，但是有个复位弹簧使无负荷时它能伸直。图3-32是表示这种假肢移动循环中的动作顺序。

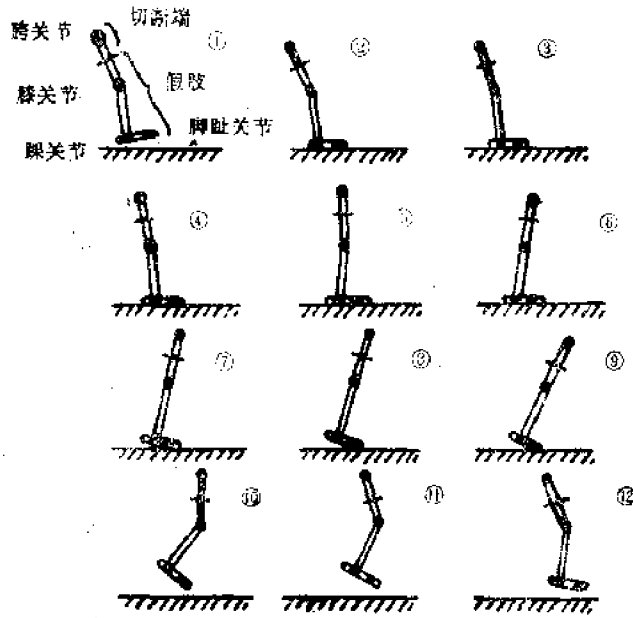
在设计此装置的控制系統时，首先应做的是把同图所示的各状态用阈值门输出的形式代码化。其中全部有8个阈值，配置如下。

(1) 指尖角度 t 指尖伸直时 $t=0$ ，若指尖向上弯曲超过给定角度时变为1。这一变化是在一步完了时脚抬起的信号。

(2) 踝角度 α 当脚向上完全弯曲时 $\alpha=0$ ，脚向下弯曲，相对小腿超过直角位置时为1。

(3) 膝角度 k_1, k_2, k_3 膝完全伸直时，这时的反馈变量全为0，随着膝关节的弯曲，首先为 k_1 ，然后为 k_2 ，最后 k_3 由0变为1。

(4) 腰角度 h_1, h_2 当截肢脚的大腿完全伸向健康腿的前方时，两个信号为0，随着



①初始状态(关节固定), ②脚跟着地, ③, ④腿回转 ⑤腿开始伸长,
⑥腿伸长, ⑦脚跟抬起, ⑧踝关节扩展, ⑨趾尖角达到限界, ⑩脚抬起,
⑪球开始伸直, ⑫腿继续伸长

图3-32 移动循环中发生的一系列动作状态

大腿向后方旋转, 最先是 h_1 , 然后是 h_2 依次由0变为1。

如完成了状态的代码化以后, 则图3-32所示的顺序可以整理成表3-3的形式。于是开始设计第二阶段。即给定各反馈状态自控执行器的输入状态, 实际上就是给定正确顺序的反馈状态。在进行给定时, 必须充分地理解控制装置的力学特性。另外, 给定并非

表3-3 移动循环状态的代码化

图号	输入值								执行器状态				状态号
	h_1	h_2	k_1	k_2	k_3	α	h	t	K_1	K_2	A_1	A_2	
1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1
2	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	0	0	2
3	1	0	1	0	0	1	1	0	1	1	0	0	2
4	1	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	2
5	1	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	3
6	1	1	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	4
7	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	4
8	1	1	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1
9	1	1	0	0	0	1	0	1	1	0	1	1	5
10	1	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1
11	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	6
12	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	1	1	6

是单一的。在同表中，表示的是使人工脚机械化的膝状态(K_1, K_2)与踝状态(A_1, A_2)的给定。另外，对于与执行器的全状态有关的给定状态号也标出来了。

此执行器网的动作，可用图3-33的状态图明确地加以表示。此状态图如果采用开关理论的设计技术则很容易变成电子回路。图3-34是用触发器与电子门实现控制的装置图。

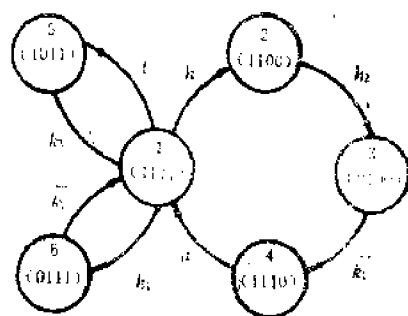


图3-33 脚控制装置的状态图

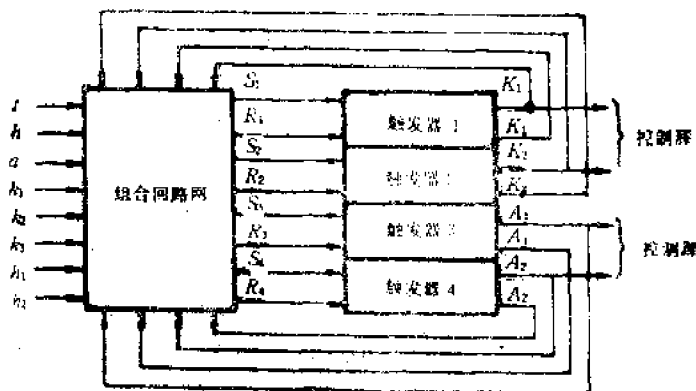


图3-34 用触发器电子门的脚控制装置

图3-33，图3-34中用于反馈信号的 \bar{x} 是电子的反转，即表示为：

$$\bar{x} = 1 - x \quad (3-8)$$

图3-33括号中的数字表示执行器状态 K_1, K_2, A_1, A_2 。

此假肢，除了平衡问题外完全是自动的。只要人自然地行走，则阈值元件或自控执行器就完全自动地发挥机能。实际上为了保持平衡还有些要注意的问题，所以这样的人工脚其使用价值是要看它给人的负担如何。

以上是有限状态理论，介绍了设计复杂的生物工程系统时，如何简单地使用控制装置问题。对这样的控制系统的简单是①只进行离散的决定就可以，②只在遇到决定点时进行离散就行。这是与通过有AD变换、DA变换的数字式计算机，以连续的方法进行信息交换的普通数字控制显著不同的。

当然，必须承认有限状态控制的成功是与开发力大并且体积紧凑的自控执行器，以及作成足够准确的有限状态模型有关。当然对上述问题的研究是有困难的，但是对有限状态系统简化的可能性是有的，所以继续对此领域的研究是有吸引力的。

上述有限状态控制的想法，即使是在微机普及的现在，用机械实现步行的复杂动作过程中还是一个重要而有效的方法。

§ 3-5 多脚行走

一 步行过程的一般分析

步行机械可以在非常荒芜的土地上移动，比如用在自然灾害的现场或地球以外的探险等。步行机械的最早实验是由弗朗克、里斯顿和毛舍尔等人进行的。最初实现的是前面介绍的4足自动机，是用有限状态理论设计的自动机。在此介绍廖(Leo)等人的6足步行机的研究成果。在此将机械进行移动时脚的运动方式定义为步行过程。在步行过程

中各脚实现下面两个不同状态。

(1) 立脚状态 在此期间内下肢的地面接触点是全支持力的支点。

(2) 抬脚状态 在此期间内下肢由地面抬起,准备下一个立脚状态的开始。

步行状态有很多种类,但是只限于与脚有关,立脚状态与抬脚状态是交替进行的。步容的定义是表示各脚在一个周期内只进行一次各种状态时脚状态的周期程序。在一个步容周期内进行的循环定义为步行循环,一个步行循环中运动的距离定义为步距。

关于6足步行机械的结构,廖等人采用了有以下3级的阶层结构。

(1) 运动控制级 这是管理系统中进行的各种运动使之正确实现的。这一级的输入由上一级给定。

(2) 算法控制级 这一级产生对运动控制级的控制信号。即按最上级的方针控制级的信息,提供各种运动动作与其随时间变化的规律。

(3) 方针控制级 在此级中,给定机械的移动特性。即决定起动、停止、步容、速度以及何时何地以何种大小进行旋转等。

各级以系统实际运动的信息进行反馈,以此对控制系统进行适当的调整。比如,这个信息是在运动控制级中,脚运动的各种状态是如何产生的;而在算法控制级中,表示脚运动的状态什么时间开始,什么时间结束;而在方针控制级中,表示障碍物,或需要依地形变化改变步容等。

二 步行系统的一般特点

这种机械的最重要条件是步行时机械不能倾倒。由于着地脚的支点而形成的多角形叫做支持多角形。加给移动机械的合力是作用在系统上的所有主动力与内力的和,它等于加在移动机械重心上的力。

在 t 时刻内,如果合力是以支持多角形内部或边界上的点与支持面相交时,则机械运动是稳定的。这时称为步行机械的静稳定。若是步距的初始条件自动地在下一个步距开始时复原时,则叫做机械的步容稳定。这些定义是按2足机械作出的,但也可推广到 $2k$ 足的情况。

如考虑到步行机械的应用,身体应尽可能保持水平。为此,廖等人采用了类似昆虫的6足结构。特别是对3足静稳定的步容进行了充分的研究(图3-35)。

步行时,首先必须是保持直进步行的速度一定。另外,研究步行的两种状态时,从整体来看,各脚的位移必须对垂直面是对称的。这时,为了使机械运动稳定,在立脚运动的开始,必要与充分条件是重心的投影应落在支持多角形的内部。因此检查这一时点运动的稳定性就足够了。

此外,在保持系统全步行能力的同时,还有使腿的位移元件数为最小的问题。而且要求保持身体水平,重心在一定水平以下运动。如支持的腿长度不变,腿与身体的关节在立脚状态间只走圆轨迹,因此重心不能保持一定。为此,支持脚的独立位移元件数必须有3个(旋转元件2个,长度变化1个)。这样腿的结构如下(图3-36)。

各腿由2段构成。上部是以两个垂直的铰链与身体连接。把这样的约束条件与执行

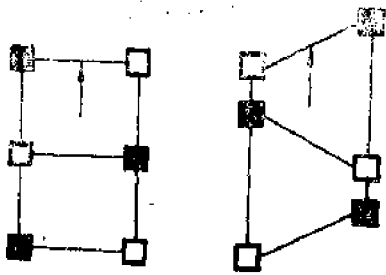


图3-35 3足静稳定的步容

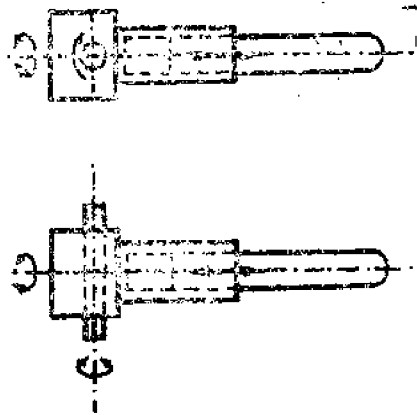


图3-36 腿的结构

器作为整体，与动物相同叫做胯关节。下部段对上部段的运动只是直线位移。把这样的约束条件与执行器作为整体，叫做膝关节。这样系统就可完全表示了。

§ 3-6 6足步行的其它实例

在此介绍俄亥俄州立大学McGhee等人研制的6足步行机械。

关节驱动执行器全部由18个电马达组成，由半导体电路进行相位控制，机器人的速度与方向是可以调节的。在各关节上装有电位计与测速发电机可以测量角度与角速度。各关节是通过蜗轮蜗杆以马达驱动，因此是有能量损耗的，即使在电源切断时，由于其自锁机构也可保持状态不变。

用上述机器人在荒地上行走时，其自适应控制方法如下。将地面分割成矩形块，然后把它们按可着地与不可着地情况分成两类地区。首先对步行机械的各个足按图3-37把可到达的区域进行定义。

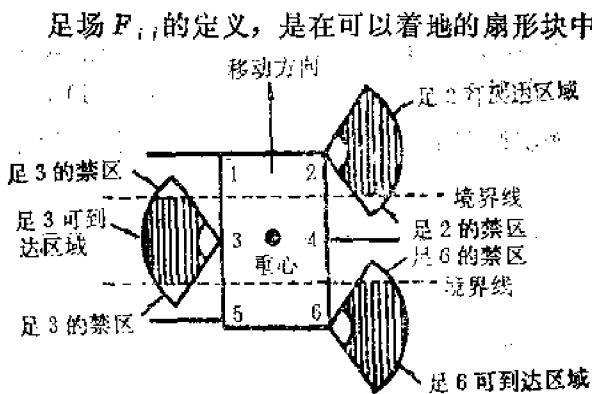


图3-37 足可到达的区域

足场 F_i 的定义，是在可以着地的扇形块中足 I_i 可到达的区域内包含着 F_i 。若足 I_i 在其中心着地时，则 F_i 变成支持点 S_i 。又当扇形块 i 是足场 F_j 时，足场存在段就是重心的投影点可以运动的最大区域。再有， F_i 的移动界限是以自重心的投影点到存在段前端的移动轨迹长定义的。

根据以上的定义，则此步行机械的自由行走问题，是使现在支持状态下的存在段和下一步支持状态下的存在

在段能重合起来而依次找出支持点。但是这样的支持点有很多个，所以有时其解并不是唯一的。因此这里要引入一个目标函数，而求出其最优的解。作为目标函数可有以下几

个。例如可取移动轨迹上的移动界限为最大，加给足的负载为最小（这种情况适于在软土上行走）；移动所需的能量为最小等。图3-38是自由步行的一个计算例子。此计算方法是为了提高行走的适应性，尽可能有更多的足抬起，因此其稳定性有些下降。

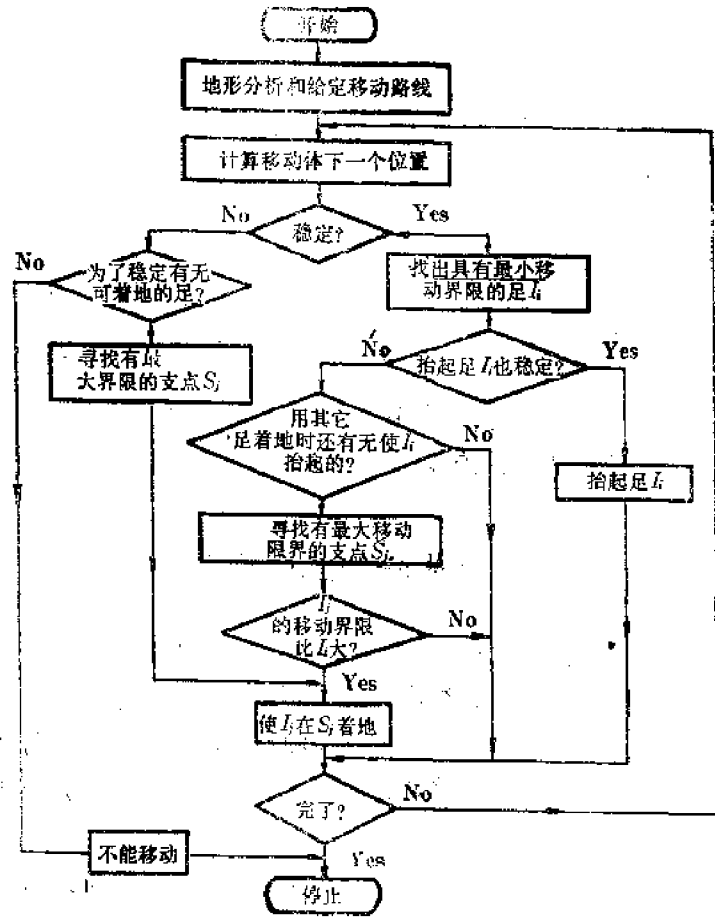
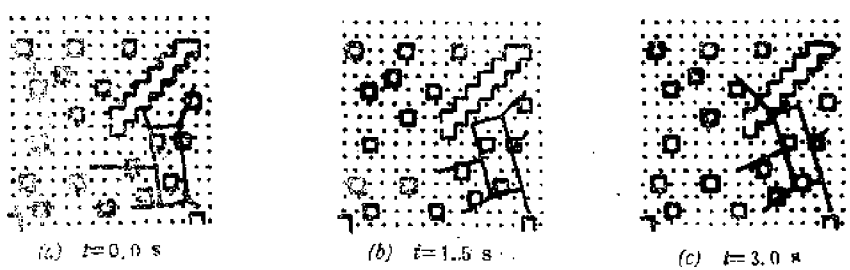


图3-38 自由步行的计算法

图3-39是以PDP11/45及AG-60等离子显示对上述计算方法的模拟结果。以点表示的部分是可以着地点，在 $t = 6$ s的时点可以实现3支脚支持。计算方法可用250句的FORTRAN语言程序写出，与1.27cm/s的移动速度下实时控制的采样时间相比，计算时间是很短的。

以上介绍了6足步行机械控制的计算方法，与此同时，该大学的克林(Klein)等人



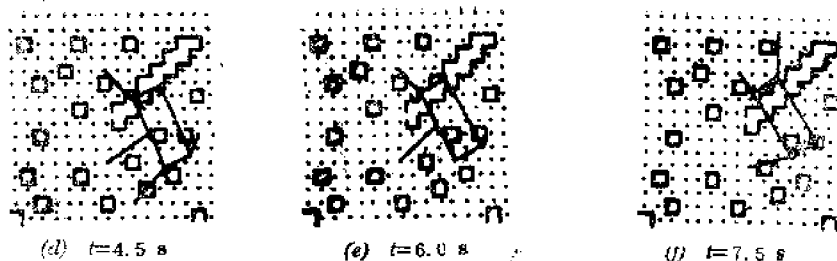


图3-39 自由步行的模拟结果

又在此6足步行机械前足的一边装上了力传感器，给脚的动作加入了主动的柔软性，对此也进行了实验。

§ 3-7 2足步行的稳定性

一 脚的执行器

Vukobratovic 等人在刚体上装了两支脚作为2足步行的模型，对其稳定性进行了研究。脚给刚体以驱动力与支持力。此脚的关节必须具备某种调节机能，此机能是通过力矩执行器与位置执行器获得的。

只有位置执行器的系统特别称为“算法系统”，在此不对它进行讨论。最一般的机械应该兼有两种形式的执行器。一个执行器用于精密定位，另一个执行器是提供力或力矩。下面的研究问题是在干扰存在时如何使步行能够稳定。

所谓干扰是指在有限时间内的参数变化而言。由于步行是重复的动作，这样的参数变化可以认为是描述机械运动微分方程式的初始条件的变化。作为修正变化的控制方式，有在各循环之初只修正初始条件差值的方法，以及用信息反馈而进行修正的方法。当然在这些控制方式中是把力控制形与位置控制形执行器组合起来使用。

二 简化系统的稳定性

所谓简化系统是脚的位置指令是用计算法进行，而动特性补偿质量是装在本体上的系统（图3-40）。步行是两脚都与地面接触，而用单足向前滑动来进行。其步容如图3-41(a)所示。同图(b)是由上向下看的俯视图形，图(c)是一步（半步长）间补偿质量的运动情况。

对一步长的第1部分（图3-41(a)①, ②）和第2部分（图3-41③, ④）的数学模型可用下面具有时变系数的一组非线性的齐次微分方程式表示。

$$\begin{aligned}
 M_1 \ddot{\theta} = & \theta^2 B_2 \sin \theta - \ddot{\Psi} (2B_3 \cos \theta + \cos^2 \theta) + \alpha [4(A_1 + A_2)(A_1 + B_1) + 2B_1 \cos \theta \\
 & + 2A_1(A_1 + 2B_1)M_1 + 4(A_1 + B_1)(2A_1 + A_2)M_2 \\
 & + 4(A_1 + A_2)(A_1 + B_1)M_3 + 2M_4 + M_5] \\
 & + \theta^2 B^2 \cos \theta + \dot{\Psi}^2 2B_2 \cos \theta + \dot{\Psi} \dot{\theta} [4B_3 \sin \theta + 2 \sin \theta \cos \theta]
 \end{aligned}$$

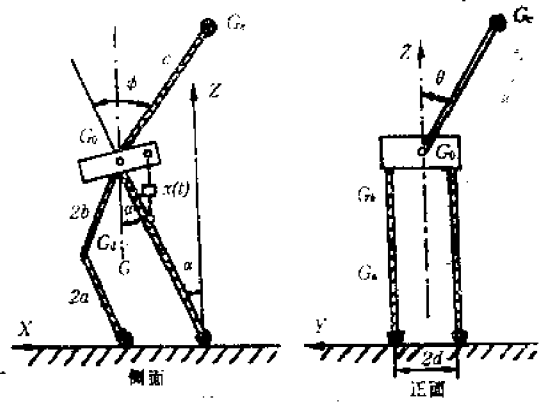


图3-40 2足移动机械的简化模型

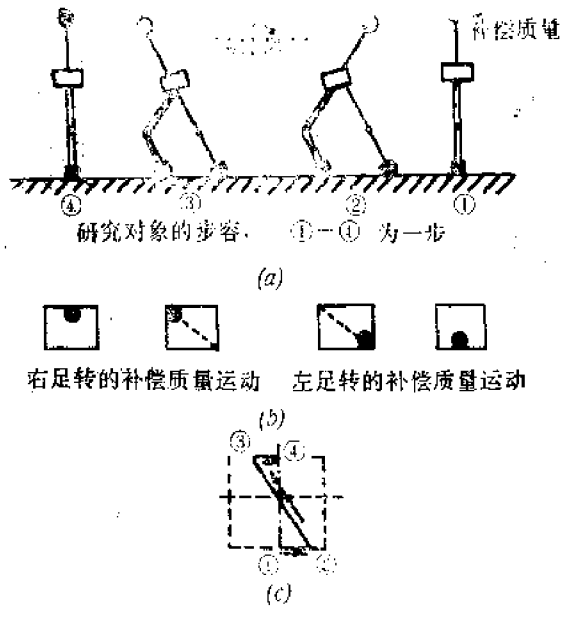


图3-41 一步长内补偿质量的运动

$$\begin{aligned}
 & -A_4[2(A_1+B_1)\sin\alpha - \cos\theta\sin\Psi] \\
 & -A_4[(2A_1+2B_1)M_1 + 2(A_1+B_1)(2M_2+M_3)]\sin\alpha = 0
 \end{aligned} \tag{3-9}$$

$$\begin{aligned}
 M_x = & \ddot{\theta}[(B_0\sin\theta - 1)\cos\Psi - 2(A_1+A_2)\cos\theta\sin\alpha] + \ddot{\Psi}(B_0 - \sin\theta)\cos\theta\sin\Psi \\
 & + \alpha^2(A_1+A_2)(B_0 - \sin\theta)\sin\alpha + \dot{\theta}^2[B_0\cos\theta\cos\Psi + 2(A_1+A_2)\sin\theta\cos\alpha] \\
 & + \dot{\Psi}^2(B_0 - \sin\theta)\cos\theta\cos\Psi + \alpha^2 2(A_1+A_2)(B_0 - \sin\theta)\cos\alpha - \dot{\Psi}\dot{\theta} 2(B_0 \\
 & - \sin\theta)\sin\theta\sin\Psi - A_4(B_0 - \sin\theta) - B_0 A_4(2M_1 + 2M_2 + M_3) = 0
 \end{aligned} \tag{3-10}$$

式中 $\Psi = \psi - \alpha$

这些式中的 M_x 与 M_y 分别是绕 x 轴与 y 轴的转动惯量。 B_0, B_1, B_2, B_3 及 B_4 其形式如下 (图3-42) :

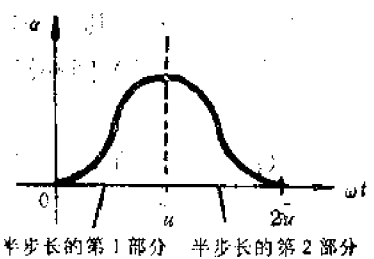


图3-42 一步长的模型

(1) 对半步长的第1部分

$$\begin{aligned}
 B_0 &= A_1 + A_2, B_1 = A_1, B_2 = (A_1 + A_2)\sin(\Psi + \alpha) \\
 B_3 &= (A_1 + A_2)\cos(\Psi + \alpha), B_4 = B_3
 \end{aligned}$$

(2) 对半步长的第2部分

$$\begin{aligned}
 B_0 &= -A_2, B_2 = -A_2 \\
 B_1 &= A_1\sin(\Psi + \alpha) + A_2\sin(\psi - \alpha) \\
 B_3 &= A_1\cos(\Psi + \alpha) + A_2\cos(\Psi - \alpha)
 \end{aligned}$$

$$B_4 = A_1\cos(\Psi + \alpha) - A_2\cos(\Psi - \alpha)$$

$$A_1 = a/c, A_2 = b/c, A_3 = d/c, A_4 = g/c, M_1 = m_0/m_c, M_2 = m_1/m_c,$$

$$M_3 = m_0/m_c, M_4 = J_0/m_c c^2, M_5 = J_0/m_c c^4$$

a, b, c, d 是 2 足步行机结构的几何特征值; m_a, m_b, m_c, m_0 是相应部分的质量; J_a, J_0 是相应部分质量的转动惯量。

描述足与补偿系统(即躯体部)关系只有一个变量, 它就是角度 α 。 α 由下式 给定:

$$\alpha = \alpha_0/2(1 - \cos\omega t)$$

式中 $\omega = \text{常数}$ 。

因步容为周期性的, 在一步的第 1 部分, 补偿系统应该满足的边界条件为:

$$\left. \begin{aligned} \omega t = 0: \Psi = \Psi_0, \dot{\Psi} = \dot{\Psi}_0, \theta = \theta_0, \dot{\theta} = \dot{\theta}_0 \\ \omega t = \pi: \Psi = \Psi_1, \dot{\Psi} = \dot{\Psi}_1, \theta = \theta_1, \dot{\theta} = \dot{\theta}_1 \end{aligned} \right\} \quad (3-11)$$

对第 2 部分

$$\left. \begin{aligned} \omega t = \pi: \Psi = \Psi_1, \dot{\Psi} = \dot{\Psi}_1, \theta = \theta_1, \dot{\theta} = \dot{\theta}_1 \\ \omega t = 2\pi: \Psi = \Psi_0, \dot{\Psi} = \dot{\Psi}_0, \theta = -\theta_0, \dot{\theta} = -\dot{\theta}_0 \end{aligned} \right\} \quad (3-12)$$

以式(3-11)、(3-12)的边界条件, 式(3-9)、(3-10)的变化就可以 给定, 可以对其求 解。

$$\left. \begin{aligned} \theta_0 + \Delta\theta_0 = -(\theta_T + \Delta\theta_T), \Psi_0 + \Delta\Psi_0 = \Psi_T + \Delta\Psi_T \\ \dot{\theta}_0 + \Delta\dot{\theta}_0 = -(\dot{\theta}_T + \Delta\dot{\theta}_T), \dot{\Psi}_0 + \Delta\dot{\Psi}_0 = \dot{\Psi}_T + \Delta\dot{\Psi}_T \end{aligned} \right\} \quad (3-13)$$

式中 T 是一步(半步长)的周期。由此可得如下的矩阵方程式:

$$[A]\Delta q = q_{T,0} \quad (3-14)$$

式中的矩阵 $[A]$ 为:

$$[A] = \begin{pmatrix} \frac{\Delta\theta_T}{\Delta\theta_0} + 1 & \frac{\Delta\dot{\theta}_T}{\Delta\Psi_0} & \frac{\Delta\theta_T}{\Delta\theta_0} & \frac{\Delta\dot{\theta}_T}{\Delta\Psi_0} \\ \frac{\Delta\Psi_T}{\Delta\theta_0} & \frac{\Delta\dot{\Psi}_T}{\Delta\Psi_0} - 1 & \frac{\Delta\Psi_T}{\Delta\theta_0} & \frac{\Delta\dot{\Psi}_T}{\Delta\Psi_0} \\ \frac{\Delta\theta_T}{\Delta\theta_0} & \frac{\Delta\dot{\theta}_T}{\Delta\Psi_0} & \frac{\Delta\theta_T}{\Delta\theta_0} + 1 & \frac{\Delta\dot{\theta}_T}{\Delta\Psi_0} \\ \frac{\Delta\Psi_T}{\Delta\theta_0} & \frac{\Delta\dot{\Psi}_T}{\Delta\Psi_0} & \frac{\Delta\Psi_T}{\Delta\theta_0} & \frac{\Delta\dot{\Psi}_T}{\Delta\Psi_0} - 1 \end{pmatrix},$$

$$\Delta q = \begin{pmatrix} \Delta\theta_0 \\ \Delta\Psi_0 \\ \dot{\Delta\theta}_0 \\ \dot{\Delta\Psi}_0 \end{pmatrix}, \quad q_{T,0} = \begin{pmatrix} -(\theta_T + \theta_0) \\ -(\Psi_T - \Psi_0) \\ -(\dot{\theta}_T + \dot{\theta}_0) \\ -(\dot{\Psi}_T - \dot{\Psi}_0) \end{pmatrix}$$

这里的矩阵叫做初始状态下对变化的感度矩阵。对下述的参数进行了分析：

$$A_1 = 0.269, A_2 = 0.283, A_3 = 0.1185, A_4 = 11.35$$

$$M_1 = 0.200, M_2 = 0.292, M_3 = 1.115, M_4 = 0.0048, M_5 = 0.0028$$

对几个周期 T ，角度 α_m 将同时满足式(3-9)、(3-10)、(3-14)的解，用平面 Ψ 、 θ 表示时，则如图(3-43)所示。它表示补偿质量的空间移动情况。

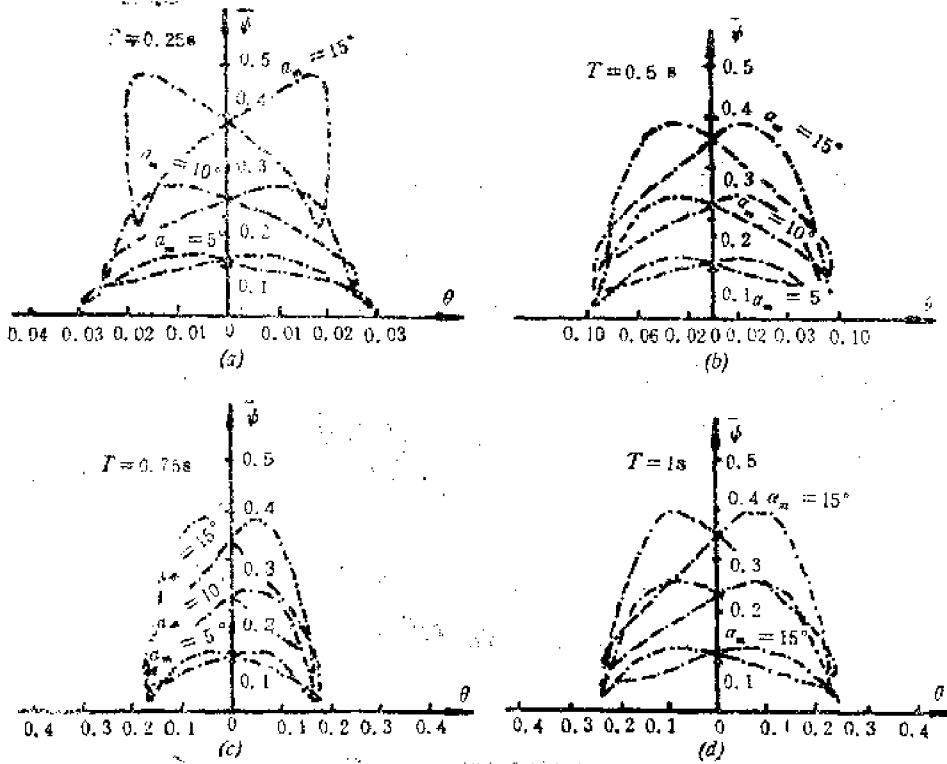


图3-43 ψ - θ 平面的相位轨迹

考虑运动基本方程式的同时，还必须研究下肢接地点系统的反作用。

$$\begin{aligned} \frac{X}{m_c c} = & \ddot{\theta} \sin\theta \sin\Psi - \ddot{\Psi} \cos\theta \cos\Psi + \dot{\alpha} \{ M_1 2(2A_2 + A_1) + M_2 4(A_1 + A_2) \\ & + M_3 2(A_1 + A_2) + 2(A_1 + A_2) \cos\alpha \} + \dot{\theta}^2 \cos\theta \sin\Psi + \dot{\Psi}^2 \cos\theta \sin\Psi \\ & - \dot{\alpha}^2 \{ 2(A_1 + 2A_2) M_1 + 2(A_1 + A_2) \times (2M_2 + M_3 + 1) \} \sin\alpha \\ & + \dot{\theta} \dot{\Psi} 2 \sin\theta \cos\Psi \end{aligned} \quad (3-15)$$

$$\frac{Y}{m_c c} = -\ddot{\theta} \cos\theta + \dot{\theta}^2 \sin\theta \quad (3-16)$$

$$\begin{aligned} \frac{Z}{m_c c} = & -\ddot{\theta} \sin\theta \cos\Psi - \ddot{\Psi} \cos\theta \sin\Psi - \dot{\alpha} \{ M_1 2A_1 + M_2 2(2A_1 + A_2) \\ & + (M_3 + 1) 2(A_1 + A_2) \sin\alpha \} - \dot{\theta}^2 \cos\theta \cos\Psi - \dot{\Psi}^2 \cos\theta \cos\Psi + \dot{\theta} \dot{\Psi} 2 \sin\theta \sin\Psi \\ & - \dot{\alpha}^2 \{ M_1 2A_1 + M_2 2(2A_1 + A_2) + (M_3 + 1) 2(A_1 + A_2) \} \cos\alpha \end{aligned}$$

$$+ A_4(2M_1 + 2M_2 + M_3 + 1) \quad (3-17)$$

式中 x, y, z 是各轴的分力。

图3-44是以式(3-15)、(3-16)、(3-17)求出的角度 α_m 与摩擦系数 μ 间的曲线,其参数为一步长的周期 T 。图3-45是 θ_{max} 与 ψ_{max} 同 α_{max} 的关系曲线,它是 T 为参数画出的。

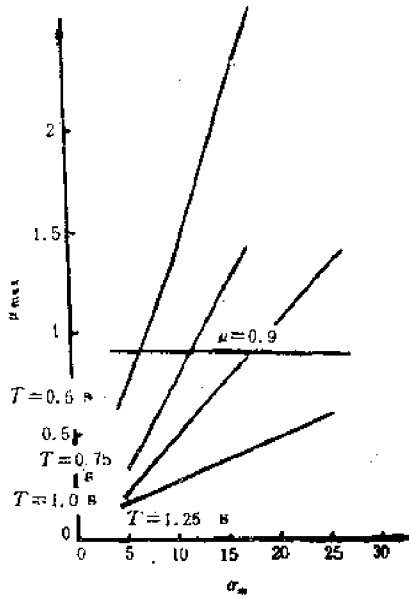


图3-44 摩擦系数随 α 变化曲线

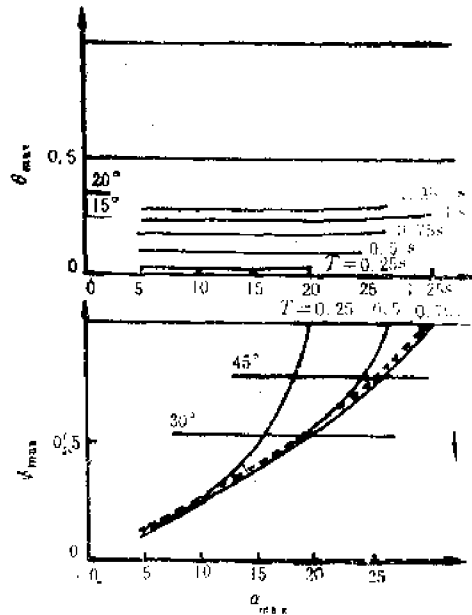


图3-45 ψ 与 θ 随 α 变化曲线

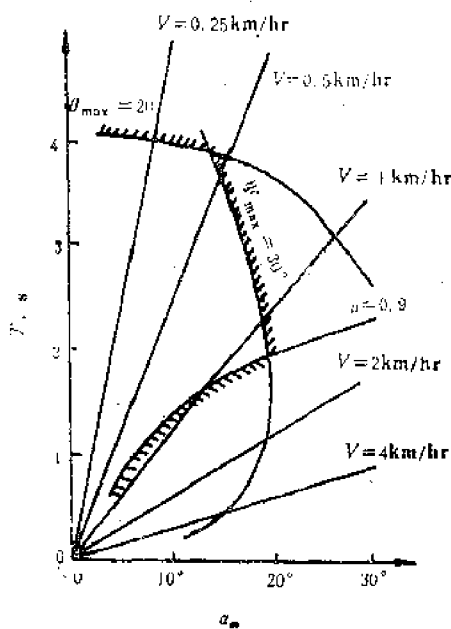


图3-46 考虑模型步容的动作图

图3-46 是在图3-44、图3-45的基础上画出的周期 T 随角度 α_m 变化的曲线。同时表示一定速度下的曲线群。此图表示在理想环境下移动时的必要条件,可用于稳定步行的可能性指标。

三 步行系统的稳定性

一般“物体”有6个自由度,其运动可用6个2阶非线性微分方程式来描述。物体的运动是用本体坐标系与惯性坐标系以图3-47的方法确定。

该图表示,由本体坐标轴的加速度计算惯性坐标系的速度与位置的方法。本体坐标系的加速度向量可由下面的向量方程式求得:

$$\mathbf{a} = \mathbf{A}\mathbf{t} + \mathbf{b} \quad (3-18)$$

式中 \mathbf{a} 是由本体坐标系的直线加速度与绕本体轴的角加速度组成的向量; \mathbf{A} 是由惯性元件与脚坐标向本体坐标的变换矩阵(6×4); \mathbf{t} 是脚坐标中加的力与力矩; \mathbf{b} 是速度耦合

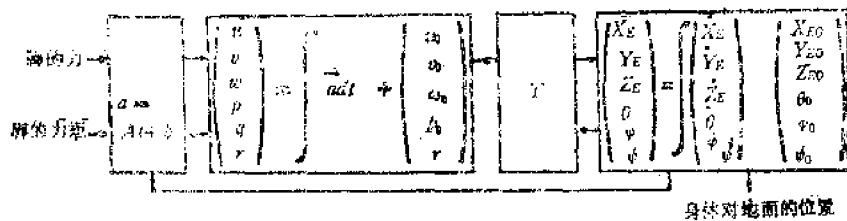


图3-47 接脚的力与力矩计算本体的角度与位置

与重力项； T 是使本体坐标速度变成惯性坐标速度的矩阵(6×6)； u 、 v 、 w 是本体坐标系的各分速度； p 、 q 、 r 是本体坐标系的滚动角、俯仰角、方位角方向的速度； X_E 、 Y_E 、 Z_E 是惯性坐标系的本体重心位置； θ 、 φ 、 ψ 是惯性坐标系的本体仰角、旋转角与方位角。

下面是模拟步行时计算顺序的实例。

(1) 首先是考虑本坐标系与惯性坐标系的位置与速度成分等12个参数组成的初始状态向量 x ，计算出与地面相接触脚的长度与接地角。

(2) 利用反馈控制法求出下肢执行器产生的力与力矩，确定脚的反力与力矩。把它们变换成本体坐标系。为了实现已定的步容，决定必要的脚位置的变化。

(3) 计算 dx/dt ，然后把它对时间积分。

(4) 返回到(1)。

在移动系统稳定性的一般分析中，引入下述三个稳定性与定义。

(1) 本体的稳定性

首先研究包括相对地面的三个角与高度的某一区域 R 。若是2足步行受到干扰时，又随时间而变化，且轨迹收敛于 R 时，则此步行是稳定的。这是在各种稳定性中首先应该考虑的稳定性。其次是考虑向前方的速度向量的稳定性。为使系统稳定，当受到干扰时必须回到重心的名义轨迹（不受干扰的轨迹）。

(2) 本体路径的稳定性

因为本体是处在连续振动状态，正确地说，不能返回到名义轨迹上，只返回到名义轨迹的某一区域内。即当以下式定义的平均速度向量能以受干扰前同方向同大小返回时是稳定的。

$$\frac{1}{T} \int_0^T \vec{v} dt = \vec{v}_{0v} \quad (T \text{为周期}) \quad (3-19)$$

此处定义的稳定步容具有如下的特点：

- ① 向前的平均速度一定，
- ② 步容一定，
- ③ 相位变化一定，
- ④ 接地系数一定，
- ⑤ 周期一定。

假定为了表示稳定步容，包括这些在内需要 k 个参数。在这些参数空间 k 中稳定步容以点 g_0 表示。当系统受到干扰时，此点移到新的点 g_1 。而且在 n 步后点 g_n 接近 g_0 时是稳

定的。但是实际的系统，由于不能重复正确的步容，所以 g_0 是取立体形态的。

(3) 稳定步容的稳定性

用 k 维向量 g 表示的无干扰系统的特性系数在区域 g_0 内，而在受到干扰后向量 g 返回 g_0 内，并停在其中时，则稳定步容可看成是稳定的。

具体研究此系统对2种干扰的响应看其结果如何。首先，图3-48是表示加入纵方向力的干扰情况。此干扰是使前向速度变化20%的力脉冲。是表示干扰加入后的几个步长。粗线是表示未受干扰的情况，细线是表示干扰后的运动情况。号数是表示各步长的收敛情形。

图3-49是表示这时步容的要素之一的步宽的变化。由此图可知，在第4.5步上时，返回到稳定步宽。

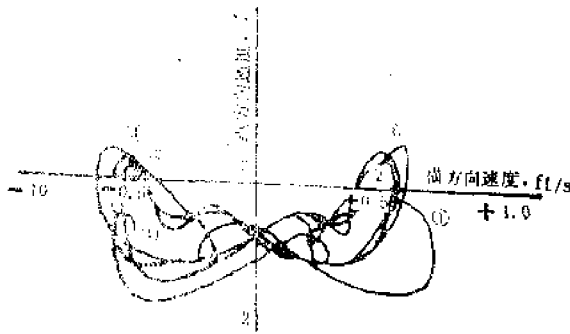


图3-48 加纵方向力干扰后的纵向与横向速度的反作用

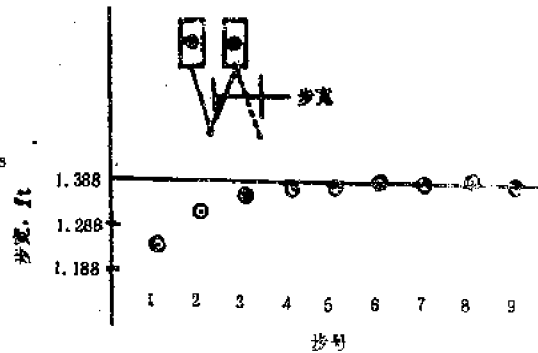


图3-49 干扰后的步宽变化

当干扰相当于脚长的20%阶梯或孔的情况时，由计算可知，经几步长后系统实际上已返回到正常动作了。

§ 3-8 人—机器人系统

机器人既然是以代替人进行操作为目的制造出来的，那么机器越普及提高，则越希望它与人相近。反之，为了使机器人技术进一步发展和普及，可以说必须对人更加了解。对研究和设计机器人的人来说，人，即人体是出发点同时也是终点。

这样，机器人技术者把人体看成是机器人的样板，并不只是以简单的机械机构来代替，而是考虑实现与人类相似的机构或机能的机器人，使用人的简化模型有助于对人体的研究。从这个观点出发，人们正在进行动物机理的研究，象人体学、体育运动学中的人体力学分析等，这些学问都是研究机器人所不可缺少的知识。下面介绍对人类两脚站立时的研究结果。

一 脚掌的力分析

图3-50是用以分析加在人脚掌上人能够站立与步行的力而制成的测定平台，上面装有4个力转换器，它是由3片圆板形压电元件组成的。这些圆板是由石英块切成，它只感知压缩力或剪切力，检测垂直方向的分力 F_z 和水平方向分力 F_x 、 F_y 。由4个检测器出

来的信号求取力的作用位置和绕垂直轴的力矩。

图3-51是小孩单脚站立10秒钟记录的力的3个分量，是记录了心理上的运动反应。这里直接测得的肌肉响应的力积 I ，是通过10秒钟把力变化的绝对值对时间积分求出来的。这种对动态力的分析，对于孩子或事故被害者的心理运动反应缺欠的初期诊断是有用的。

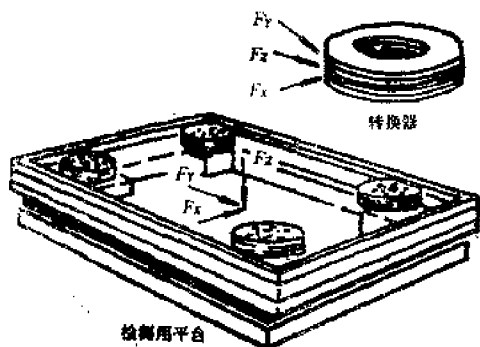


图3-50 瞬时力分量测定器

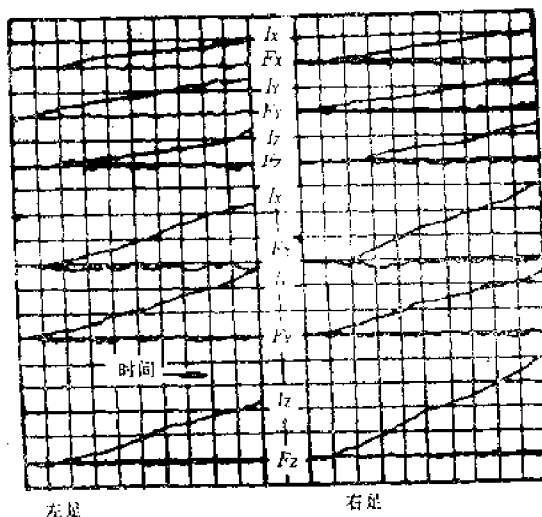


图3-51 小孩单脚站立时测得的3个分力

图3-52 是对跳远运动员离地瞬间各力分量的测量结果的记录。这是使田径教练感兴趣的记录。此研究结果表明，总力积 I_z （对 F_z 的时间积分）与跳远的距离是有密切关系的，水平方向的力积 I_x 、 I_y 值虽高，对跳远的距离没有什么作用。

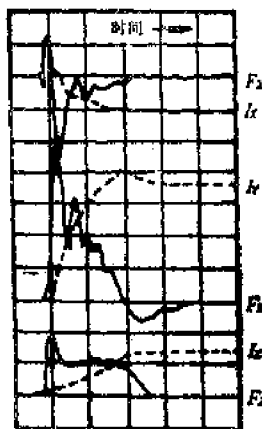


图3-52 跳远时离地瞬间的分力

二 装卸作业中的运动动作分析

神户大学的岩田等人认为，在机械的自动化与省力化中为了探讨人机系统的工作方式，从运动学与动力学的观点搞清作业者的动作特性是非常重要的，所以他们选择了作业中最基本的装卸作业，对作业者的运动动作进行了分析。

1. 人体的数学模型

为了分析人体的动作特性，必须测定作用在身体各部的力与力矩。但是，目前直接测量身体内部传递的力与力矩是不可能的。因此，要把身体的各部分用适当的模型来代替，观测其相应点的运动轨迹，依此通过求解运动方程式来推算出这些力和力矩。一般人体的数学模型按运动的自由度可分为2维模型与3维模型，但是很少是以全身为对象的，所以用2维模型就可以了。

为了建立数学模型，首先把人体分成如图3-53所示的15个组成元素，各元素以等价的圆柱近似代替，假定与其相邻接的元素都是以球形接头连接的。

其次，为了描述身体各部分的相互力学关系，只限定进行装卸时的动作分析，其运

动是左右对称的，可用图3-54所示的2维模型代替。

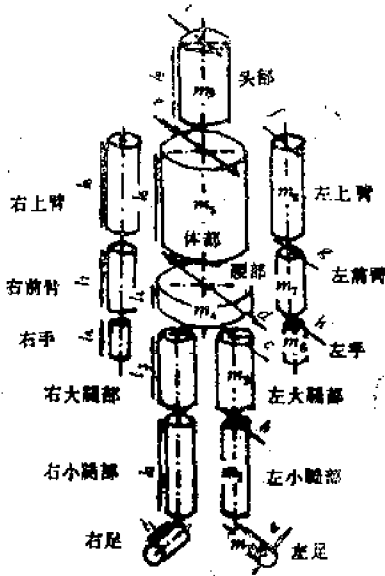


图3-53 身体组成部分的圆柱近似

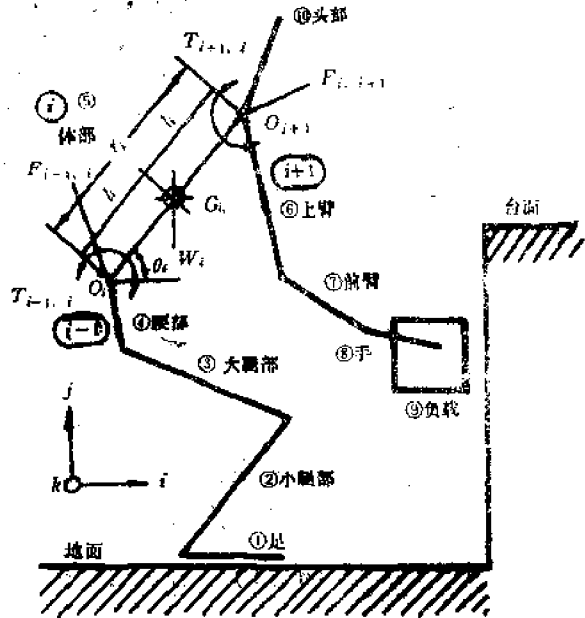


图3-54 2维模型

图中由①到⑩是将图3-53的身体各元素以刚体元素来代替，特别是元素号⑨是正方体的负载，在此可看成是手部的延长。

在此模型中，对任意刚体元素③的运动方程式如下：

$$F_{i-1,i} - F_{i,i+1} - W_i \cdot j = (W_i/g) a_{G_i} \quad (3-20)$$

$$T_{i-1,i} - l_i \hat{r}_i \times F_{i-1,i} - T_{i,i+1} - l_i \hat{r}_i \times F_{i,i+1} = I_{G_i} \alpha_i \cdot k \quad (3-21)$$

$$a_{G_i} = a_{O_i} + (-\omega_i^2 l_i \hat{r}_i + \alpha_i l_i k \times \hat{r}_i) \quad (3-22)$$

$$a_{O_i} = \sum_{j=1}^{i-1} (-\omega_j^2 r_j \hat{r}_j + \alpha_j r_j k \times \hat{r}_j) \quad (3-23)$$

式中 r_i 是刚体元素③的长度； G_i 是刚体元素③的重心； l_i 是按 G_i 进行2等分的长度（此处认为各元素都是均质的，重心在圆柱的中心）； W_i 是刚体元素③的重量； I_{G_i} 是绕重心的转动惯量； $F_{i-1,i}$ 是由刚体元素③作用在刚体 $(i-1)$ 上力的向量； $T_{i-1,i}$ 是由刚体元素③作用在刚体 $(i-1)$ 上的力矩向量； O_i 是刚体元素③与比其编号小的刚体元素的连接点； a_{O_i} 是静止坐标系 O_i 处的加速度； a_{G_i} 是静止坐标系 G_i 的加速度； θ_i 是在静止坐标系中绕刚体元素③的 O_i 旋转的角位移； ω_i 是静止坐标系中绕刚体元素③的 O_i 旋转角速度； α_i 是静止坐标系中绕刚体元素③的 O_i 旋转角加速度； \hat{r}_i 是表示刚体元素③的方向的单位向量； g 是重力加速度。

脚与地面接触有脚全部或脚指尖两种情况，但是因为脚是刚体，所以从理论上求力

对地面作用点的分布或力的配置是个静不定问题。无法求解，故为了方便起见，在此假定只有脚指尖与地面接触而脚后根不与地面接触。

2. 实验与结果

因为实验是检测人体，所以对被测者给予异常的感觉或由于加检测仪器而造成负担时，都不利于取得运动分析的资料。因此使用非接触形高速检测方法，它是使用16mm的高速摄影机由被测者的侧面将运动动作拍照下来。但是用这种方法也存在着坐标的读取误差，或在身体上由于装设标志引起的身体弹性变形或由运动而产生的皮肤变位等均造成误差。

对这些误差，岩田等人将实验数据数值化的同时，将16mm胶片的影像按每个像差自动地投影到自动投影仪上，用描笔通过按压目标标志将坐标位置输入给计算机，使以后的数据检验及算出平均值等处理变得容易了。

又考虑到前面所说的误差或数值化时的误差，对各角位移的时间序列数据进行平滑化处理，使用下式所示的数字式低通滤波器：

$$Y(n\Delta T) = \sum_{\mu=0}^M a_{\mu} X((n-\mu)\Delta T) \quad (3-24)$$

式中 对输入时间序列 $X(n\Delta T)$ 的输出是 $Y(n\Delta T)$ ；滤波器的 $M=32$ ，系数 a_{μ} 是在离散时间 $\Delta T=1/40$ 秒，其截止频率为5.2Hz时确定的。

图3-55是拿起与放下负载时腰的角度变化与膝的角度变化以相关图的形式在示波器上的显示图。

图3-56是在负载相同进行抬起放下动作时，作用在腰、膝、肩关节周围的力矩计算结果。这里力矩的符号是以相邻刚体元素在向关节中心扩展方向上作用的力矩为正。

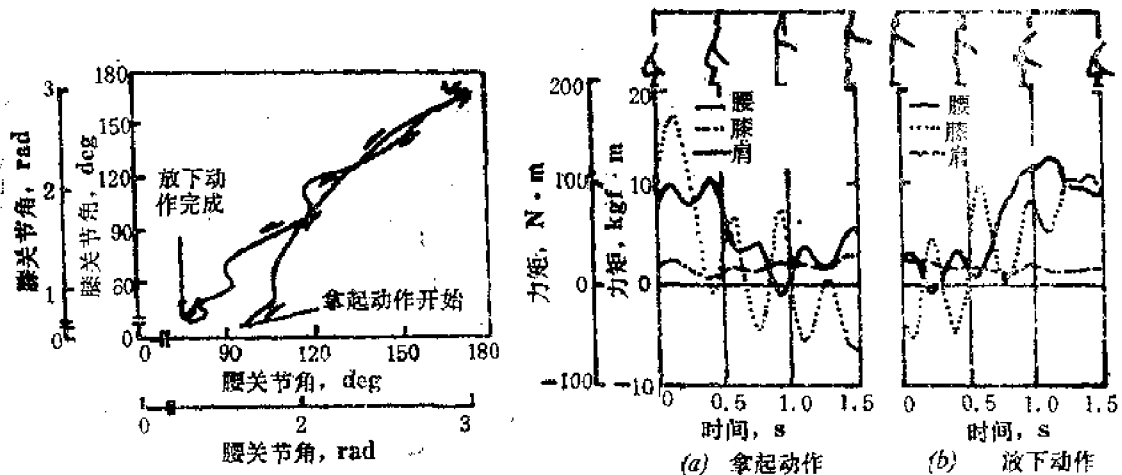


图3-55 腰与膝关节角的相关图

图3-56 腰、膝、肩上的作用力计算

由图3-55~图3-56可知，不论是抬起还是放下动作，腰与膝几乎是同时进行伸直与弯曲，其动作是密切相关的。但放下动作与抬起动作稍有不同，在腰、膝间角度变化的相关图上有凹凸变化，最后，与抬起动作的开始部分相比要稍微前倾之后才完成放下动作。这是在放下负载时，为了使负载放在指定位置上腰与膝的弯曲时间错开，其结果表

明能很好地控制负载的位置。

由图3-56可知，作用在腰、膝上的力矩峰值是交替出现的，与机械的同时控制具有不同的特点。

如上所述，在此研究中利用全部记录图形之后，进行了人体模型的再现并获得了相应的数据，其分析结果具有一定的参考价值。

三 步行动作的分析

熊本大学的高滨等人用16mm高速摄像机对步行动作进行了分析，图3-57是实验原理图。

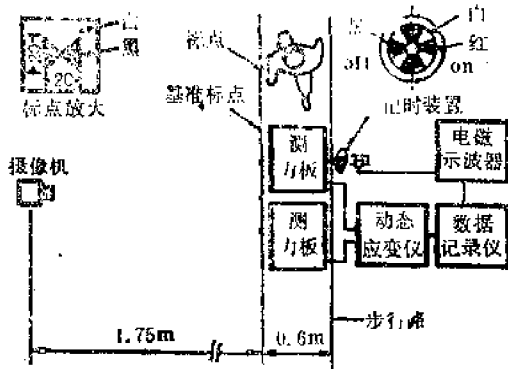


图3-57 步行实验原理图

图3-58是把头颈部点令其一致合成的图形，同时记录了检测的地面反作用力与由加速度求出的作用在上体的传递力。

如上所述，随着人体模型的精确建立，检测人体的方法及提高其检测精度，可应用于机器人的具体结构。这并不是把人体的所有机构通过机械在机器人上实现，而是为了达到某一目的的要求，作为机器人的重要组成部分加以实现，这是完全可能的。

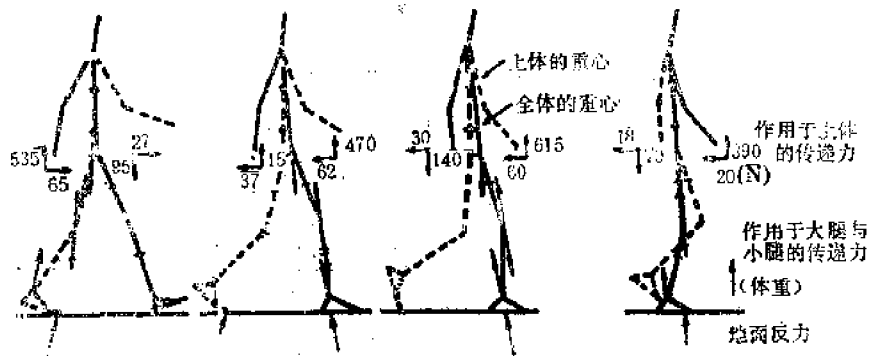


图3-58 作用上体、大腿及小腿上的传递力与地面反力

第四章 传 感 器

§ 4-1 机器人用传感器的概况与分类

一 概况

传感器在所有自动控制机器中既是最古老也是最新的问题。在机器人中也是一样。

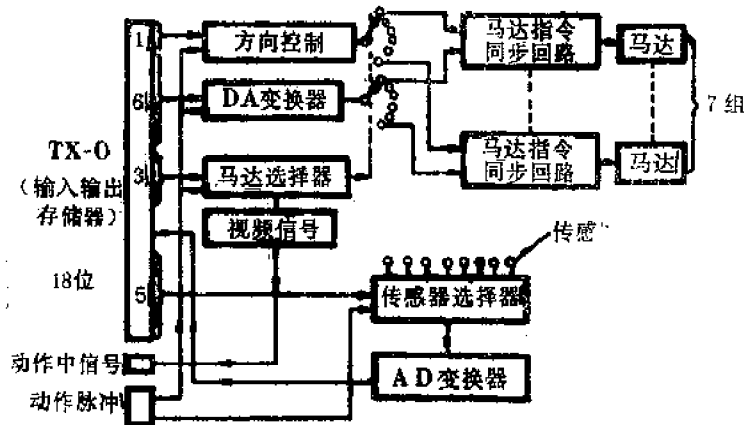


图4-1 MH-1控制装置方框图

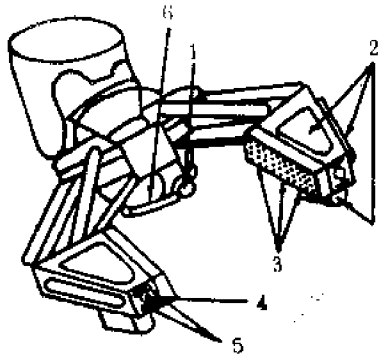


图4-2 MH-1的手部与传感器
图中1:接触时开关接通,知道手指间对象物的位置;数字输出
2:接触时开关接通;每块板上2个,共6个传感器;知道与手部外侧接触;数字式输出
3:橡胶衬垫上有6个压觉元件;知道把持力与把持位置;按电阻变化得到连续式输出
4:光电二极管;感知对象物的影像
5:手部的压觉元件(与3是一种)2个
6:手腕下部的压觉元件;手到桌上时接通,数字式输出

20年前,美国的MIT开始用计算机控制机器人,所以,机器人传感器作为决定机器人性能的重要元件又开始了新的研究。

MIT的计算机控制机器人的设想是由MIT大学沙恩与明斯基两人提出的,后来由该大学的研究生艾伦斯特以计算机控制MH-1型机械手的形式作为论文发表的。艾伦斯特研究的MH-1型机械手的控制方式是后来各种机械手的基本形式。在此机械手的手部外侧装有触觉传感器,内侧单方向装有6个压觉传感器,此外在内部最里边与手部前端装有用于确认的传感器,其水平之高是令人吃惊的。

图4-1是MH-1控制装置的方块图,图4-2是表示手部的传感器布置图。

这一机器人完全是智能机器人,即研究室内的机器人。在成本低,可搬重量大且高度可靠的工业机器人中一般很少用这种传感器。然而近几年,即

使在工业机器人中，通过微机控制的也越来越多了。装设传感器很容易，通过传感器提高性能的要求也日益迫切了。

例如，我们研究用机械手进行作业的例子。目前工业用机械手中的多数是重复按预先给定动作的所谓录返型。这种形式在严格管理的作业环境下可以有效地完成作业，但是当被把持对象的位置变化时，其作业环境发生预想不到的变化，这时就无法进行作业。即按示教进行动作有时就不能进行作业，或者与对象物发生冲突，这些都可能引起机械手本身或对象物的破坏等现象发生。为了改善这种状况，给机械手装上传感器，象人类一样利用感觉器官以适应环境变化而动作，随时检测周围环境的变化和机械手本身的状态，以修正与这些变化相对应的动作。

目前，具有这样适应机能的工业机器人已在弧焊机器人中部分地实用了，但是今后在比工业机器人更高级的各种机械手中使用传感器是很重要的。

二 机器人用传感器的分类

一般人类具有视觉、听觉、触觉、味觉及嗅觉等5种感觉，但是机器所要求的传感器可分成如下两部分：为了对环境产生相适应的动作而取得环境信息的外界传感器；根据指令而进行动作，检测机器人各部状态的内部传感器。每一组传感器又可细分，图4-3即为机器人用传感器的分类。

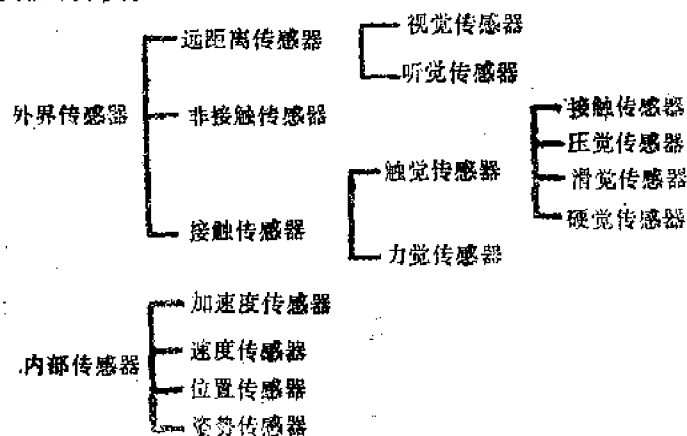


图4-3 机器人用传感器的分类

外界传感器，由于其接触与非接触状态取得信息的不同，又可分为非接触传感器与接触传感器。在此两者之间还有一种比较近距离的传感器，但都是为了取得距离很近的物体的有无或距离大小的信息，从机能上来看是与接触传感器很接近的。

接触传感器可分为触觉传感器与力觉传感器。触觉是与人的皮肤感觉相当的，但是机器人用的接触感觉、压觉、滑动感觉及硬度感觉是比较主要的。接触感觉传感器是探知与对象物接触与否并能给出开闭信息的数字式检测传感器，压觉传感器是检测作用在接触面上力的垂直分量给出模拟信号的传感器。滑动感觉传感器是检测与对象物接触状态下接触面的相对运动，即检测相对速度的大小与运动方向的传感器。硬度感觉传感器是检测给对象物加力时变形情况的，也是可看成是力传感器与位置传感器的复合应用。

以上的触觉传感器，从其机能上可见，都是装在机器人手部的，在把持对象物时，

是为了控制把持力或控制把持位置而得到反馈信号，或者通过把持动作用于认识对象物的形状和材质等属性。另外，力传感器是检测由外界作用在机器人上的力，所以不一定非放在接触部附近不可。如在关节部分内装进力传感器，可检测手部，把持物体的重量就是其中一例。由此传感器的作用可知，它又被称为内部传感器。通常所谓的内部传感器是指加速度传感器、速度传感器、位置传感器及平衡感觉传感器。

近接感觉是利用电磁感应，或静电电容的变化或光等效效应形成的开关，利用气动进行近距离位置的检测，检测的信息虽简单，但是在生产线上还是很实用的。

§ 4-2 机器人用传感器的实例

下面介绍机器人手部的重要传感器，即触觉传感器与压觉传感器的实例。

一 触觉传感器

因为触觉传感器主要是知道手部与对象物有无接触，所以装设简单的通-断式开关就可以了。用于确定简单对象物的把持动作，即使在手的内部装设一个也可使机器人的机能得到很大的提高。

此外，不只是确认把持对象物的动作，如要进一步知道被把持物体的大致形状或把持位置，必须在狭窄的手部内侧装设很多个这样的通-断式传感器，并且其装设密度要高。因其数量多与高密度使开发传感器的困难程度增加了。为了实现高密度的设置，每个传感器必须是小形的。此外，每个开关通-断时的反作用力叠加起来又使得刚度变得很大，所以难于成功。

上述多开关高密度布置的触觉传感器如图4-4~图4-7所示。

图4-4是利用有孔基板，将氨基甲酸乙脂泡沫在孔的位置上以销钉固定，再把泡沫未压缩部分的表面用石墨化碳纤维或导电橡胶包围起来，当碰到对象物时，泡沫被压缩，则碳纤维与销钉接触，开关呈现接通状态。

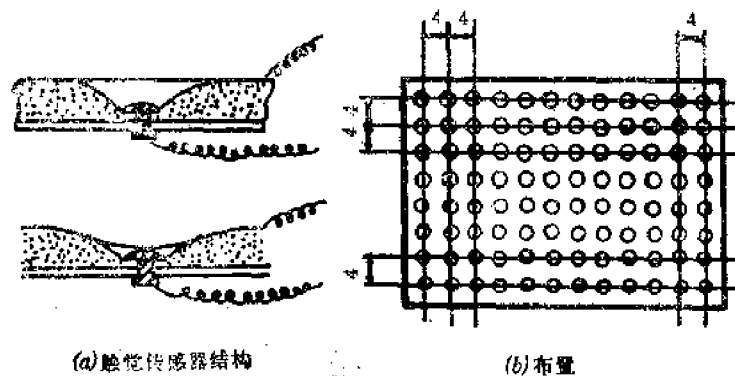


图4-4 开孔基板式触觉传感器

图4-5是相当于把图4-4的销钉突起移到表面可动侧的情况，突起压导电橡胶之后，由于与基板上的金属相碰，开关处于接通状态。

但是，一般触觉传感器，除了上面提到的数多、高密度问题外，还有把持对象物的把持力是怎样承受的问题，以及把持之后到开关接通期间内如何使时间迟后缩短的问题。即开关本身随着对对象物的把持动作而产生垂直方向的力和剪切方向的力，这时就变成小的开关本身受到较大的力，这对于实用的工业机器人来说是增加了困难。因此，图4-4与图4-5的方法都是可进行高密度布置的结构，但是传感器本身要承受把持力，还有到开关接通要一定的时间等，这是这种结构的缺点。

图4-6所示的传感器是在消除上述缺点方面加以改进的。此传感器是将两基板的金属薄片相对放置，通过夹在其间的活塞状小销钉的升降动作，得到两块基板通断信号的一种结构。在一般的情况下，上下基板的传感器部分是按上基板-销钉-金属弹簧-下基板的顺序导通的。由于支持销钉的弹簧刚度非常低，上面与对象物一接触，很小的力作用就可使销钉下沉。而且下沉的同时，上面的导通回路被切断，则变成断接的状态。因此由接触到断接的时间基本上可看成为零。

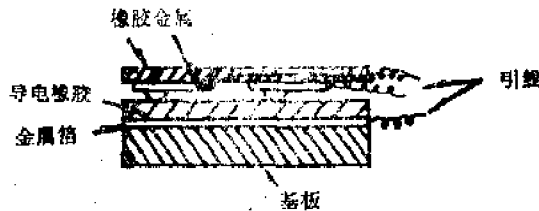


图4-5 导电橡胶式触觉传感器

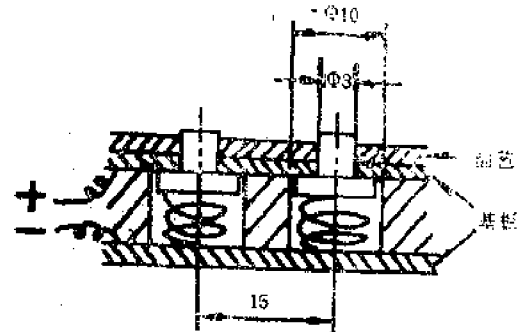
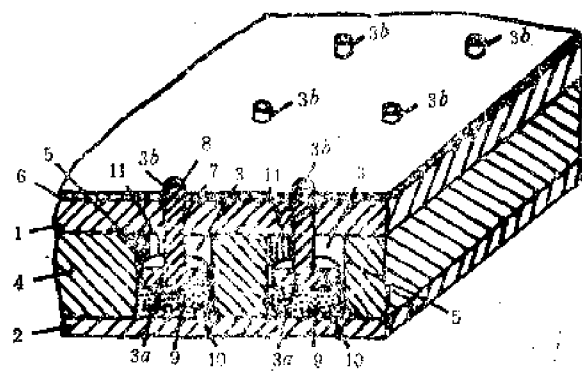


图4-6 弹簧式高速高密度触觉传感器

另外，此销钉一旦沉入孔中，销钉就与手部接触的上平面处于同一水平上，由此产生的对象物保持力就由基板与基板上面的橡胶来承受了，即使是把持力很大，传感器本身也不会承受更大的作用力。

再有，虽然上面与下面的金属薄片是按每列孔进行公共配线的，但是由于在上面与下面是按列的方向垂直的，当然点的位置可用矩阵变换电路求出。



1、2：基板，3：接点销，3a：柱状基座，3b：棒状销
4：有孔板，5：孔，9：弹性体，10，11：极板

图4-7 利用海绵的触觉传感器

这种传感器的缺点是在弹簧两端确保电气接触方法的问题。

图4-7是对上述缺点加以改造的结构。用海绵等弹性体代替弹簧，销钉与下基板间的距离变化是通过电容变化而取出来的。如若上方基板的销钉上下滑动孔的下半部分与镀过的基板一样，在其内表面也镀金属时，则沿此孔上下滑动的金属制销钉下面与上基板的电位是相同的。销钉与孔接触的部分是金属的，由此开始的向上部分是绝缘体。它是随着销钉下面与下基板间距离变化而电容变化的检测方法，由于这样的仪器其成本大幅度降低。所以即使

由于这样的仪器其成本大幅度降低。所以即使

作成多点的也并不困难。又与图4-6同样，孔的位置可通过矩阵变换电路求得。图中的上板由于具有屏蔽效应，所以用导电橡胶等制造较好。

这种方法的缺点是结构变复杂了，且由于是利用电容变化法，要注意由各列引出导线的屏蔽，此外每个传感器的信号电平不能完全一致等。

图4-8是用导电橡胶高密度布置触觉传感器的另一个方案。图中2是圆盘状或块状的导电橡胶，如从上边作用把持力时，则6、7两个信号线连接的橡胶形体上的2点阻抗值就变化。同图(b)是与图4-6，图4-7同样的矩阵变化电路的位置判断回路。这种方法也可用于简单的压觉传感器。

以上是多点高密度布置的触觉传感器的例子，此外还有很多其它形式。但是作为材料都是以往常用的，为了促进多点传感器的发展，能够达到实用化，开发新材料是十分重要的。

二 压觉传感器

压觉传感器有：

1. 使用应变片组的。
2. 使用弹簧及电位计或差动变压器组合的。
3. 使用导电橡胶的压力改变电气阻抗的。

上述中的(1)，(2)是触觉传感器中用得较多的。

图4-9是利用板弹簧与应变片的压觉传感器。板弹簧的宽度是30mm，板厚为1mm

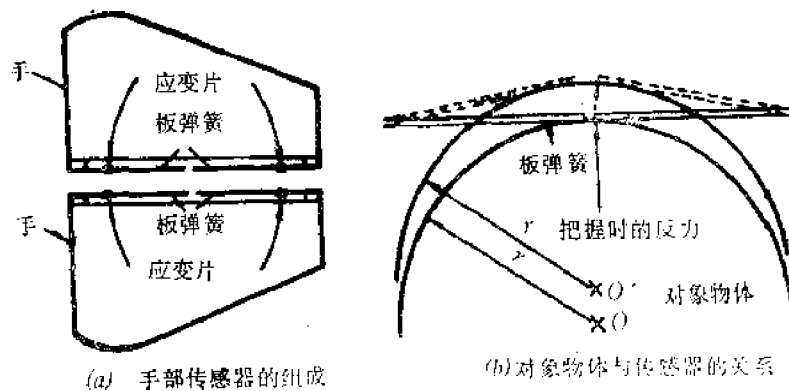


图4-9 用板弹簧与应变片的压觉传感器

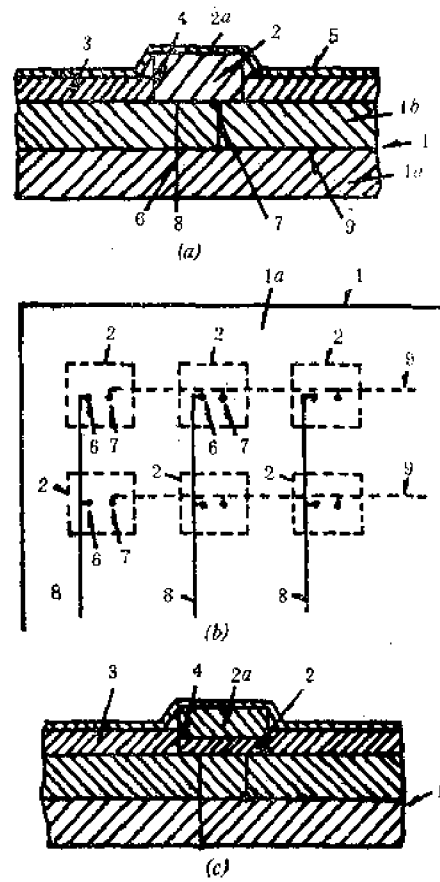


图4-8 用导电橡胶的高密度布置触觉传感器

时，检测与把持对象物重量可达3.2kg，板弹簧厚度为2mm时，可达25kg。

上述的对象物重量的值是在圆柱状对象物放在手部中央时的情况，但是在偏离中央部位时由于手部入口与里面的每两个应变片输出大小不同，则可利用此输出的差很容易进行使之返回手部中央的位置检测。

图4-10是用弹簧与电位计的压觉传感器，由于把持力使弹簧产生变形，通过滑动电位计或差动变压器进行检测，就可求得把持力的大小。又在此把持面上装有图4-6所示的多点触觉传感器，就构成了具有触觉与压觉的传感器。通过此触觉、压觉传感器就可判断对象物的软硬程度。

图4-11是判别软硬法的图，图(a)是在把持对象物开始后，触觉传感器就处于接通状态，图(b)是当把持力再加大后，对象物产生弹性变形的状态。如使用图(a)，(b)的符号，则

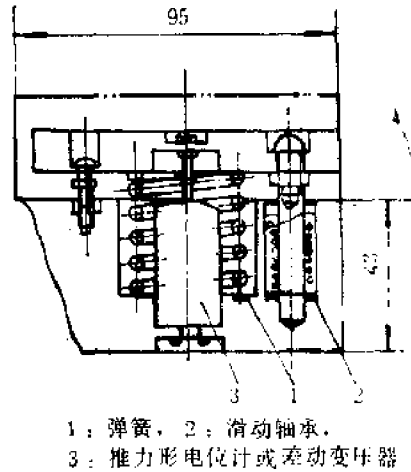


图4-10 弹簧与电位计滑动测位的压觉传感器

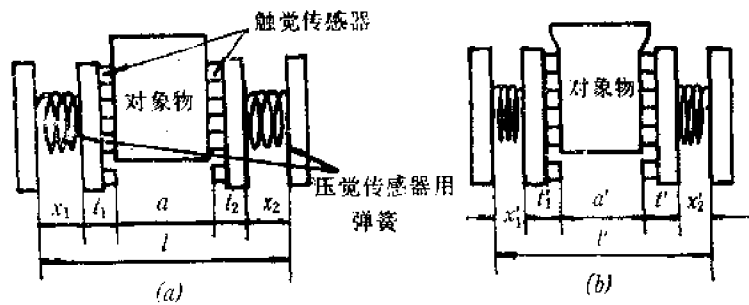


图4-11 用触觉与压感传感器的软硬判别法

$$x_1 + x_2 + t_1 + t_2 + a = l$$

$$x'_1 + x'_2 + t'_1 + t'_2 + a' = l'$$

如假定式中 $t_1 \approx t'_1, t_2 \approx t'_2$ 时，则

$$l - l' = \Delta l$$

因此， $x_1 + x_2 = x, x'_1 + x'_2 = x'$ ，则

$$\frac{\alpha - \alpha'}{\Delta l} = 1 - \frac{x - x'}{\Delta l}$$

因此，可用下式评价对象物的硬度。

$$H_d = \frac{x - x'}{l - l'} = \frac{\Delta e}{\Delta l}$$

对于一定的手指关闭量，如若对象物是非常硬的，则对象物不变形只有弹簧变形。如若对象物是非常软的，则弹簧基本不变形，只有对象物产生变形。因此，若 Δl 为一定时，则对象物的软硬可通过 Δe 来判断。

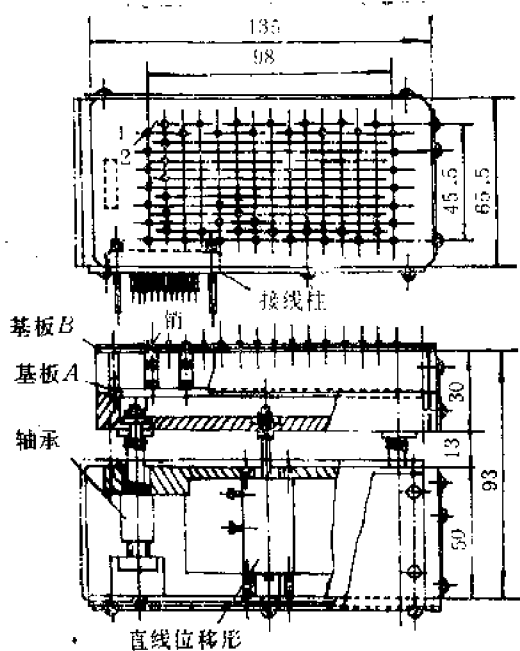


图4-12 触觉与压觉传感器的改进

易疲劳。因此可在良好地重复性下长期使用，但其缺点是输出电压非常容易受到温度变化的影响。

三 最新的压觉传感器

下面，详细介绍近几年研究的压觉传感器的二个实例。英国的瓦尔维克大学对图4-13所示的碳纤维压觉传感器进行了研究。

此传感器的特点是利用纤维的柔软性和强度大的特点，而且其动态范围宽，成本低。众所周知，碳纤维是将树脂硬化后形成重量轻强度高的微细碳纤维材料。这种材料不仅强度高而且导电性也好。下面研究两根纤维接触时的状况，一般其接触处为一点。如对两纤维加以力的作用，则接触部分发生弹性变形后其接触面积增加。这时纤维接触部的阻抗减少。即使是多纤维集成成毛毡形，其结构相同，在负载状态下其阻抗也减小。

图4-14是其特性图。由图可知，负载的范围可扩大到 10^4 。但是值得注意的是负载

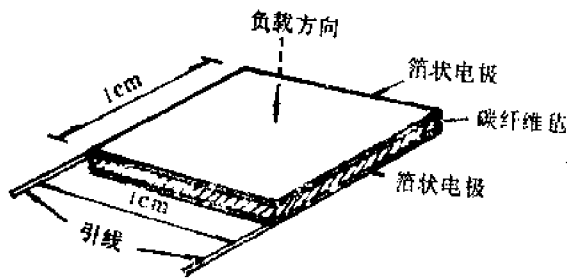


图4-13 碳纤维力传感器(无负载 40Ω)

图4-12是对上述的触觉和压觉传感器又加以改进的结构，基本原理是相同的，只不过它易于使用和提高了可靠性。

上面介绍了应变片与板弹簧的组合，或弹簧与电位计等的组合而形成的各种压觉传感器，但是这些型式有明显的缺点：为了使压觉传感器的感度提高而使板弹簧的变形量过大，难于实现小型化。

但是，把半导体的pn结做成针状后，可使力集中在一点上，如压的力很大而使硅接近于破坏的程度时，由于压电结合的效应，就可以很小的位移把力变成电变形。

这样的特性，可在压电元件中见到。这样的半导体传感器或压电元件，与上述的机械式传感器相比，因其变形很小就不

易疲劳。因此可在良好地重复性下长期使用，但其缺点是输出电压非常容易受到温度变化的影响。

三 最新的压觉传感器

下面，详细介绍近几年研究的压觉传感器的二个实例。英国的瓦尔维克大学对图4-13所示的碳纤维压觉传感器进行了研究。

此传感器的特点是利用纤维的柔软性和强度大的特点，而且其动态范围宽，成本低。众所周知，碳纤维是将树脂硬化后形成重量轻强度高的微细碳纤维材料。这种材料不仅强度高而且导电性也好。下面研究两根纤维接触时的状况，一般其接触处为一点。如对两纤维加以力的作用，则接触部分发生弹性变形后其接触面积增加。这时纤维接触部的阻抗减少。即使是多纤维集成成毛毡形，其结构相同，在负载状态下其阻抗也减小。

图4-14是其特性图。由图可知，负载的范围可扩大到 10^4 。但是值得注意的是负载

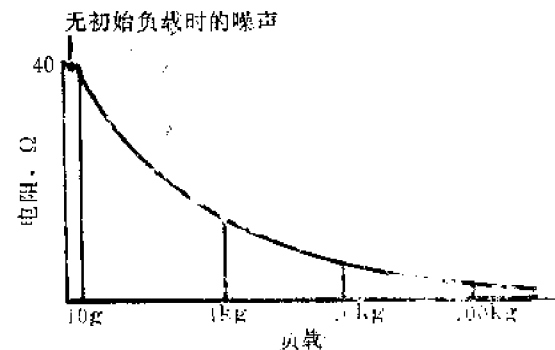


图4-14 加负载时碳纤维力传感器特性

或纤维毛毡固定不牢时，由于纤维元件的振动其噪声变大。为了减小噪声要使传感器牢固地固定，必须加上使用负载后使其变牢。但是此噪声随负载加大而减小。如1g负载，初始阻抗为1kΩ时，其值为0.5%左右。另一点值得注意的是滞环的问题。由实验得知，由初始负载1g加到许用负载之后，再返回时阻抗误差是在1%以内，其数值是比较小的。

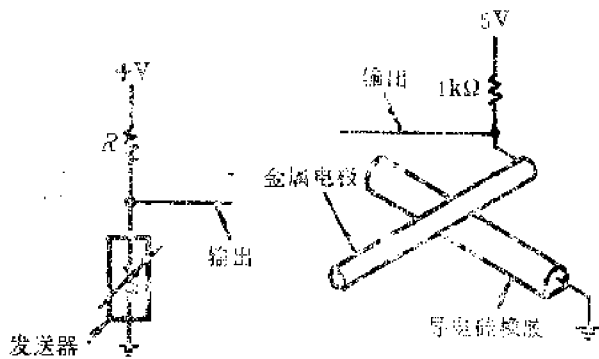


图4-15 用导电硅橡胶的压觉传感器

在实际安装时，电极的装法是非常重要的。为了提高其可靠性，使用将金属薄片硬化的粘接剂进行粘附的方法是最好的。

这样制成的传感器成本低且牢固，其可靠性也高，可取代进行通-断动作的开关，其用途非常广泛。

此外，美国MIT研究了用导电性硅橡胶的压觉传感器。结构是很简单的，如图4-15所示，是将断面为D字形的导电硅橡胶与金属电极交叉接触放置。其结果与瓦尔维克大学的相同。其输出信号如图所示，组成固定电阻与电桥而得到模拟信号。

图4-16是电线直径为0.15mm时的负载与传感器输出的关系曲线。此特性是对数的，其动态范围很广，适于用作传感器。通过改变R可使感度特性发生一定的变化。接触部分是以有导电性的粘接剂固定的。另外，此传感器非常坚固，已证明在1MPa的负载下也具有相当好的力检测机能。

在进一步将其扩大到面上力的测定时，如图4-17所示，取矩阵变化电路即可，其实现是很简单的。

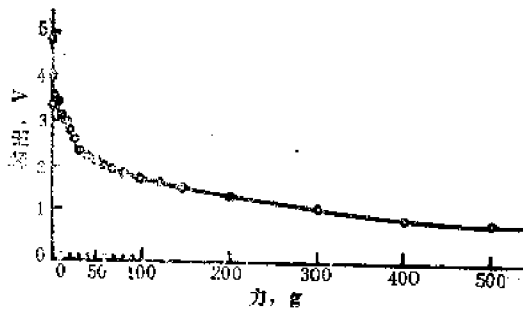


图4-16 加载时的硅橡胶力传感器特性

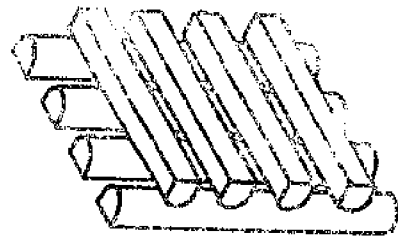


图4-17 矩阵变化电路的结构

将导电硅橡胶分两层互相垂直地布置，只将其凸面相向接触即可。这样，各接触点都是力的检测部分，把某一行的导线密封接地，某一行的导线通过电阻加上电压，就可测得交叉点的负载了。但是必须注意在回路上想办法使各检测点不产生干扰的现象（如图4-18）。

这些数据的测取在自动地对各接触点扫描之后进行。特别是对于大的矩阵变化电路其扫描时间较长时，首先对列进行扫描，然后只对发生接触的列再扫描行，这样可得到高速化的效果。试作了16×16的矩阵变化电路，并通过试验检验了力检测机能。

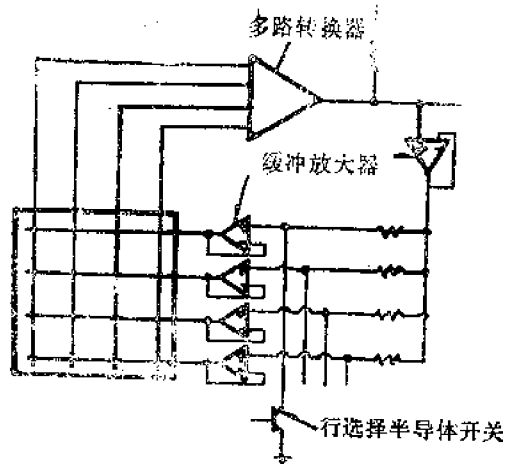


图4-18 矩阵变化电路力传感器接点扫描电路

在实际使用时，用柔软的人造革将上述的导线包起来，下面的导线装在坚硬的表面上。但是当把这种传感器装在曲面上时，传感器本身的变形就成为初始载荷，排除这种初载是一个问题。要特别注意这一点后再去组成结构，在处理时要把残留的信号去掉。

这个传感器的特点，第一是可以检测二维平面的力，并且分辨率较高，第二是结构较坚固，可以承受过负载，并且由于输出信号大，可直接作为A/D变换的输入信号。

下面介绍传感器今后的发展方向以及希望的参数，结合前面的分类介绍几种传感器。

§ 4-3 对传感器的评价

在开始评价之前对感觉谈点认识。图4-19中表示的是感觉的机能。所谓感觉是把物体表面和内部状态的物理特性检测之后将其变成要求的信息，大致可分成两个阶段。第一阶段是向物理信号（多半是电气信号）的变换，第二阶段是由得到的信号抽出必要的信息。而后者又可分为消除噪声等的前期处理和更高级的信号分析两部分。为了制造出更好的传感器，必须设法改进上述各个阶段。

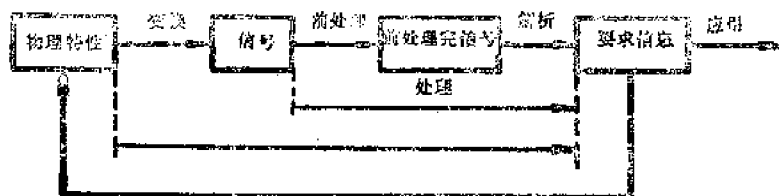


图4-19 感觉机能的概念图

机器人代替人进行作业时，其必要的感觉可按下面进行分类。

(i) 内部感觉：监控机器人系统，姿态信息关节负载，内部温度等内部状态的感觉；

(ii) 外界感觉：监控对象物的存在，识别、辨识、位置姿势的检测，检测对象物的表面状态，内部状态等，是对机器人周围环境状况的感觉。下面由前面分类中取出其中几个主要的传感器对其存在的问题以及改进方法作一简要的介绍。

一 视觉传感器的改进

视觉传感器是最主要的传感器之一。现在的摄像机其光导摄像管或半导体成像元件

是用 CCD、CID, MOS 制成的传感器。下面提出今后应改进的项目。

(1) 摄象机本体

成象元件: 小型高分辨率 512×512 或 1024×1024 个成象单元, 使有缺陷的成象单元为最少; 感度均一与高感度化; 扩大动态范围, 提高辨色机能。

镜头: 自动曝光; 自动对焦(包括紫外线在内); 低变形低价格。

调谐设备: 小型轻量并有一定的强度; 高速控制视线方向; 高速对准目标的机能; 利用细金属丝使安装位置具有柔软性。

(2) 对象物的照明

照明方法应有利于改善图象的 SN 比; 使用扫描式照明; 使用最佳照明光(可见光、紫外线、红外线、激光)。

(3) 处理的一体化

将硬件与软件有机地组合, 使之标准化易于处理; 应具有处理二进制数据, 明暗数据的基本软件; 能变成机器人控制指令信号; 开发各种作业下的通用操作程序。

(4) 信息处理的硬件化

开发能进行边缘检测、相关计算、屏蔽及褶积等基础运算的半导体元件(MOS、CCD)。

另外为了用视觉传感器得到距离信息, 用两张画象数据的立体图象、聚光的三角测量和由光的往返时间测量得出的距离测量。立体图象是两个图象相对应点的测量问题, 希望能进行可靠的高速处理。使用聚光的情况下, 只要从两个地方能看到聚光, 在不能满足此条件时要考虑信息处理的作业量, 增加摄象机。因为激光需要取得反射光, 希望高输出化与扩大检测区域, 但是有安全性、尺寸与成本问题。

此感觉用作机器人的感觉是不常用的。随着高分辨率、高精度、范围的扩大, 小型、低成本的实现等传感器自身的改进, 应进一步扩大应用面。

二 接触传感器的改进

1. 接触传感器

微型开关是最基本的, 用于判定一点的接触是足够的。比如在难于使用视觉的混浊海水中要认清物体时, 需要多点接触的传感器。但是, 已开发的多点接触传感器其柔软性并不够, 对空间的分辨率也不足且尺寸又大。因此, 需要开发高分辨率的柔软传感器。在多点检测时, 因为由传感器出来的信息导线很多, 必须装入微处理器, 以传感器部分形成信息处理的一部分。如能实现这样的传感器, 则可对物体的位置、姿势进行检测和识别。

2. 力觉传感器压觉传感器

目前, 测定力/力矩三个分量的传感器半导体应变仪是最好的。其应改进的地方是小型、轻量及低成本化, 高分辨率和实现广范围的动态。特别是由于小型化, 如果能进行多点处力的检测(分辨率为1mm左右)时, 装在机器人的手部, 就可在手掌的正确位置上以适当的力无滑动地把持对象物, 这样机器人的适用范围就会扩大。此外, 使用微处理器的信息前期处理是必要的, 它可使应用传感器变得容易。

三 其它传感器的问题点及其改进

因为非接触传感器是判断在其附近是否有物体存在，利用涡电流测量距铁板距离的方法在焊接自动化中是早已使用的。其它方法，有把LED与光敏晶体管组装在一起，很好地处理来自物体的反射光之后测知距离的方法，但其缺点是其效果取决于物体表面的反射特性和反射面的姿势。其解决办法可考虑用视觉传感器检测距离信息的方法。

此外，还有现在机器人没有使用的方法，例如听觉传感器，温度传感器等。广义地说，如认识音响也包括在传感器机能之内时，听觉传感器的开发是与由音响表现的异常、故障的自动检测及其自动的排除、还与人给予机器人指令的改善有关，但在此只能指出这种传感器的重要性。

§ 4-4 传感器的信息处理

一 视觉信息处理

从搬运的角度看机器人时，它与传送带等传送装置不同的地方是可沿空间内的任意轨迹移动。当然此任意轨迹是由程序规定的，就不能象人操作时那样随意。当被搬运的对象物不是放在确定位置上时，人要检测出它所在位置和认识物体状态之后才作出行动。

现在的工业机器人是由臂、手部、驱动装置、控制装置、记忆装置和示教装置等组成的。而且是按录返动作或程序控制动作进行的。但是对作业空间等周围状态不能认识，对状态变化无适应能力，对达到目的与否自己也不能认识等，是其重大的缺欠。因此无法实现与人类相同的动作。

为使其成为接近人类动作的机器人，需要具备人工智能，所以要研究人工智能。又为了知道周围的状况与搬送的物体，对图形认识的研究有很大进步。这些技术对提高机器人机能是必要的。

在确认物体在什么地方，其形状如何及其存在姿势之后决定行动的方针，进行完成动作，然后对行动的结果进行评价，这是对智能机器人要求的必要内容。关于只知道位置这一点，用普通的检测技术是可以实现的。但是要想知道形状与姿态时，就需要人类的感觉机能了。

认识物体的方法，有视觉的方法与触觉的方法两种。人工的视觉信息接收器，现使用的有光导摄像管和图象管等摄像管和固体摄像元件。作为触觉信息接收器现在没有更合适的，但可用感压橡胶、继电器触点、应变仪、伺服系统的稳态位置误差、金属片的导通、光弹性、包线延迟线、半导体电阻、喷嘴挡板及含碳海绵等。

用摄像管时，把光电面上的映象分割成多数的矩阵状的格子，以其格子结点的信息作为输入数据。一般通过AD变换器存到计算机中，采用以计算机处理的方法。因为在计算机中只处理0, 1, 如果使图象的分解度提高时，则计算所需的存储量变得非常大，而且其处理时间也要加长。

只要用现在的接收器，将二维平面的信息变成以时间为基本参数的一维信息之后再

使用。因此，为了提取形状特点的处理程序其工作量很大。又何况对人类的信息处理方法还未清楚，所以似乎还应有其它的方法。

对于低能的昆虫类来说，以眼睛进行光学处理，再把它变成表示形状特征的数据，似乎是把数据量压缩之后再把有用数据送到大脑中。青蛙等也是如此。开发与眼睛相似接收器就是开发控制技术。

如果可能开发把3维信息变成低阶信息的变换处理技术，对触觉也是这样。

1. 三维物体的形状识别

为了使机器人能认识环境，最重要的是要知道机器人手与被抓取的对象物体间的相对位置关系。而且，一般的物体都是具有三维的形状特性，所以必须识别其形状特性。一般，人可不加思索地判断出对象物是箱子还是轴件，是男人还是女人，但是机器人只能认识在规定的环境中比较简单的立体物。

认识三维物体的基本方法如下。

把摄象管的光电变换面按纵横方向分割成几十乘几十的格子。把与各格子点处明亮度相当的连续电气输出进行AD变换，然后把它作为1~10位的数字信息存储起来，作为计算机的输入信号。这时把全画面、1/4画面、1/16画面影象面分割，按与对象物大小合适的目标规定画面的大小，以之提高分辨率。

在计算机中进行消除噪声、空间微分、找出有效的线段、按最小二乘法决定线段、决定顶点和区域，实行对象识别程序。

例如，立方体是由六个面构成的。此平面的交叉部就是棱边，检测棱边两侧平面的明暗变化就等于检测出了棱边。因此，沿着摄象管的扫描线对明暗信息的微分就可得出棱边的信息。

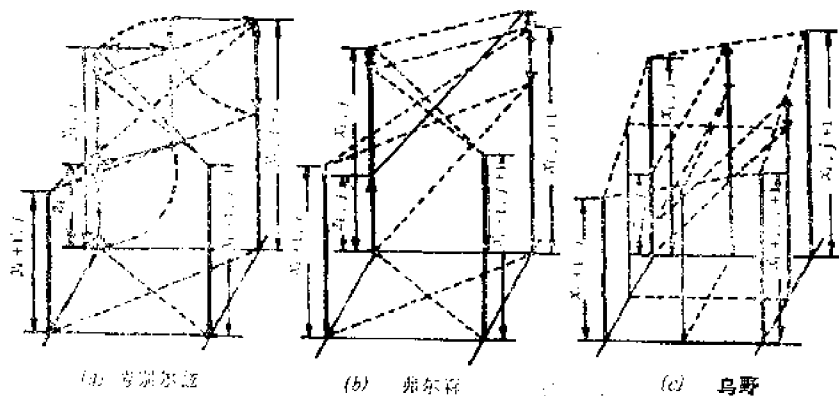


图4-20 空间微分

作为微分式，劳别尔池(Roberts)提出了如图4-20(a)所示由明暗信息中切出 2×2 的矩阵把沿对角线方向相减的差加起来的办法。

$$y_{i,j} = \sqrt{x_{i,j}}$$

$$z_{i,j} = \{(y_{i,j} - y_{i+1,j+1})^2 + (y_{i,j+1} - y_{i+1,j})^2\}^{1/2}$$

而弗尔森(Forsen)把上式进行了简化，使用下式：

$$z_{i,j} = |x_{i,j} - x_{i+1,j+1}| + |x_{i,j+1} - x_{i+1,j}|$$

但是弗尔森的方法对棱边部分得不出相同的微分增益。而乌野对此又加以改造提出了如下的微分式：

$$z_{i,j} = 1/2\{|x_{i,j} - x_{i+1,j} + x_{i,j+1} - x_{i+1,j+1}| + |x_{i,j} + x_{i+1,j} - x_{i,j-1} - x_{i+1,j-1}|\}$$

此式如图4-20(c)所示，它是由4个明暗信息组成的四边形各边中点的数值相加后得到的，所以可准确地检测端点。諏訪等人，为了同时进行空间微分、明暗度差的方向检测和除去噪声影响的三个作用，使各元素的绝对值的分布相等，对中心以同心圆分布，引入各个上下、左右符号不同的 8×8 矩阵形式的加权函数 $W_1(i, j)$ ， $W_2(i, j)$ 之后，得出了如下的微分式：

$$D_1(I, J) = \sum_{\substack{1 \leq i \leq 8 \\ 1 \leq j \leq 8}} W_1(i, j) \times P(I+i-1, J+j-1)$$

$$D_2(I, J) = \sum_{\substack{1 \leq i \leq 8 \\ 1 \leq j \leq 8}} W_2(i, j) \times P(I+i-1, J+j-1)$$

用这样的微分式进行计算之后，按諏訪的方法，用下式可求得格子点 (I, J) 的微分量：

$$D(I, J) = |D_1(I, J)| + |D_2(I, J)|$$

又其方向是把 180° 分成8个扇形，按下式加上由1到8的号码，以整数表示方向是属于哪个扇形，把它们分别存储起来。

$$A(I, J) = \begin{cases} \left[\frac{8}{\pi} \left\{ \frac{3}{16} \pi + a(I, J) \right\} \right] & a(I, J) \geq -\frac{\pi}{16} \\ \left[\frac{8}{\pi} \left\{ \frac{19}{16} \pi + a(I, J) \right\} \right] & a(I, J) < -\frac{\pi}{16} \end{cases}$$

式中 $a(I, J) = \tan^{-1}\{D_2(I, J)/D_1(I, J)\}$ 。

进行上述处理后所得到的有效线段输出是具有某一范围的值。通过对微分最大值的寻求，进行使此值的范围变小的操作。为此，由存储的空间微分输出而得到的矩阵中可切割出如图4-21所示的 3×3 小方阵。当 (I, J) 格子点的线段周围的线段方向基本平行时，只剩下相邻微分值中最大的，其它的都被消除了。

$D_4 A_4$	$D_3 A_3$	$D_2 A_2$
$D_5 A_5$	(I, J) $D_0 A_0$	$D_1 A_1$
$D_6 A_6$	$D_7 A_7$	$D_8 A_8$

图4-21 切出有效线段
 3×3 小方阵

例如，在图4-21中，假定 A_0 是表示水平方向的扇形1。下面看看上下相邻的点 A_3 与 A_7 。当这是1、2、8的任何一个时，周围的线段基本上可看成是平行的。与 D_6 、 D_3 、 D_7 进行比较，只剩下最大线段，其余全部消去。

对全体运用此操作之后，微分的最大值就剩下了。即得出了棱边的候补点。把此棱边的候补点组成一个棱边的线段群进行分组，用最小二乘法使直线与线段群重合，把棱边用 $y = \alpha x + \beta$ 的一次方程式表示。图形的顶点由这方程式的交点来决定。按这种方法可得到顶点的坐标、棱边的方程式，这样就可以识别图形了。

2. 立体的识别

空间微分后的几步处理结束时，对象物就可根据构成其立体的棱与顶点在二维坐标上表示出来。若对象物是一个时是不成问题的，但是当有几个物体在一起时，就把它们当成是重合的情况进行考虑。因有必要将二维的象解读成三维的并加以判断。

在此方法中，有用数字表示的方法和结合特征分类的方法。但这些方法还都没有进入实用阶段。即使是立体形状，也只是对以平面组成外形的立体物作了尝试，如外形是曲面的还没有解决。在此介绍古茨曼(Guzman)的结合特征分类方式。

假如按前述的处理方法，已求出了如图4-22所示的以棱线表示的线条画。它已经以顶点的坐标、棱的方程式以及由棱包围成的区域的名字形式收入了计算机中，而不是把图4-22所示的实际图形收了进去。古茨曼进行了顶点的探索，象人们看了图4-22之后进行解释一样来求解。也就是决定区域是属于哪个物体的外表面。

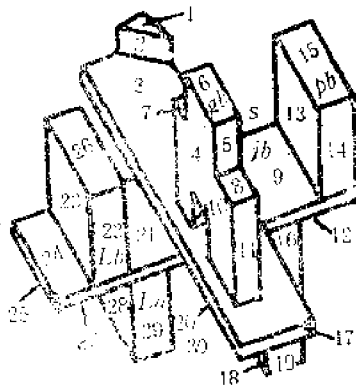


图4-22 线条画的例子

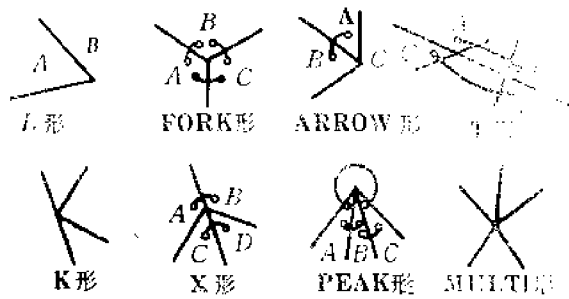


图4-23 顶点的分类

顶点按图4-23进行分类。顶点的形式，根据其顶点分成的区域是属于同一物体这一点，可以有以下三种情况：①要提供充分的证据，②提供不太充分的证据，③要提供其两者的证据。按这样的分解是从人们习惯的认识一致的观点进行的，而不是以逻辑加以决定的。

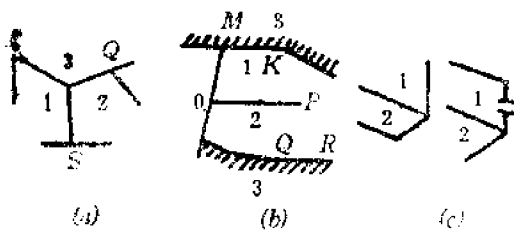


图4-24 不符合图4-23规律的顶点

在图4-23中提供充分证据的是FORK形、ARROW形、X形、PEAK形及T形的顶点形式，作成了以下的区域结合规律。

(1) FORK形 三个区域都不是背景的情况，对 $A \sim B$ ， $B \sim C$ ， $C \sim A$ 结合都提供充分的证据。但是如图4-24(a)

所示， Q ， R 是 L ， T 形顶点时， $3 \sim 1$ ， $3 \sim 2$ 的结合并不存在，只有 $1 \sim 2$ 的结合。

(2) ARROW形 对区域 A ， B 的结合可提供充分的证据，对于 C 不能判断结合的状态。

(3) X形 在以两直线交点的形式表示时不能判断结合的状态。如图4-23所示，当左右的直线倾斜度变化时，可提供 $A \sim B$ ， $C \sim D$ 的充分结合证据。

(4) PEAK形 除了包含钝角的区域之外,对所有区域都可提供充分结合的证据。即 $A \sim B \sim C$ 。

(5) T形 找出与现在对象物顶点平衡的另外T形顶点。所谓平衡是指两个T形在同一直线上相互对置而说的。若是它们有几个同时存在时,要选出其最接近的。如图4-23中 A, B 是一对。这样的顶点对 $A \sim B, C \sim D$ 的结合可提供充分的证据。当不是背景结合时,此结合可忽略。另外单独的T如图4-24(b)所示,1,2都不是背景,它们是相邻区域,当1的背景与边界线MK(对2也是一样)与T的中线OP平行时,对1,2的结合可提供充分的证据。

提供不充分结合与充分结合证据的顶点如图4-24(c)所示。其ARROW的箭头的边构成L形,进而L的一端与两个区域的边界线平行。这时按ARROW分成的两个区域为充分与不充分结合。

使用图4-22进行说明。因为图中的顶点 P_6 是FORK形,所以在13~14~15间存在充分的结合。顶点 i_6 也是FORK形,但因为 S 顶点是T形,所以5~9的结合不会发生,只有5~8,8~9的结合。另外,因顶点 L_2 与 L_1 是一对对置的T形,发生22~28,21~29的结合。

如将这些操作都按顶点来进行时,就可得到如图4-25所示的结合状态图。由此状态图用下面的规则就可进行组合了。

规则1:两区域是以两个以上的充分结合连接时,它们的区域可结合成一个核。

规则2:在某一个区域或核中,只有一个充分结合的核,但若有不充分结合时,则此两个区域可结合成一个核。用上述两个规则,则图4-25的状态图就变成了图4-26的形式了。

规则3:在按上述两规则处理后,区域与核两者以一个充分结合而连接,在此之外没有结合时,它们可归纳成为一个核。

按此操作,图4-22中所示的状态可看成由8个物体来构成。

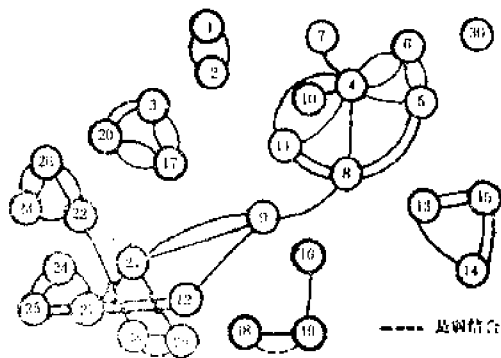


图4-25 结合状态图 (数字表示图4-22的区域)

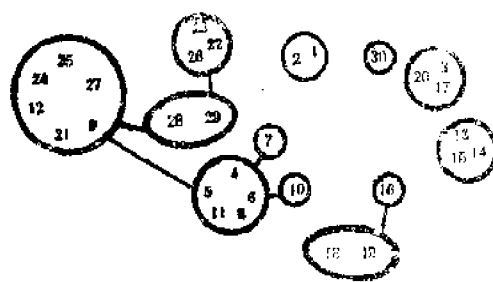


图4-26 结合状态图

3. 平面图形的识别

即使是三维的对象物,而作为机械零件其多数都是由简单的平面图形构成的,以三面图中有特点的一个面也可以识别对象物。在这种情况下因对象是平面图形,通过一定的方法也可以实现实际应用的视觉处理。

例如,用平面图形求出并识别所谓形状固有值参数的方法。

形状固有值是按图4-27所示的投影定义的。即对于平面图形的第一基准线1，如图所示与1垂直的平面图形长度 P_1 、 P_2 ，把此长度沿1移动变换就叫作投影，而把包络投影图形的长方形与原来图形的面积比 S 定义为形状固有值。

$$S = A_p / A_s A_v \quad (0 \leq S \leq 1)$$

在平面图形中，除了是4的倍数的多角形以外， n 角形与其姿势无关，都分别有不同的且一定的形状固有值。另外象图4-28那样，各种图形随着姿势不同具有周期性变化的形状固有值。为了识别具有 S 的图形，分别取 S 的最大值与最小值为 S_{\max} 与 S_{\min} ，则 S 的平均值与偏差值分别以下式定义：

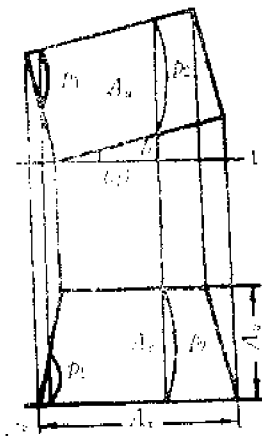


图4-27 平面图形的投影

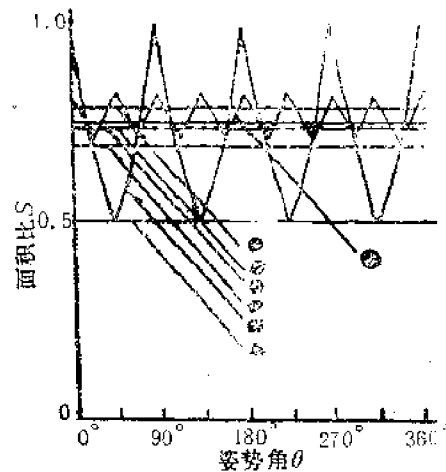


图4-28 形状固有值随姿势角的变化

$$\bar{S} = (S_{\max} + S_{\min}) / 2$$

$$\Delta S = (S_{\max} - S_{\min}) / 2$$

对各种图形在 $\bar{S}-\Delta S$ 平面上的位置如图4-29所示。

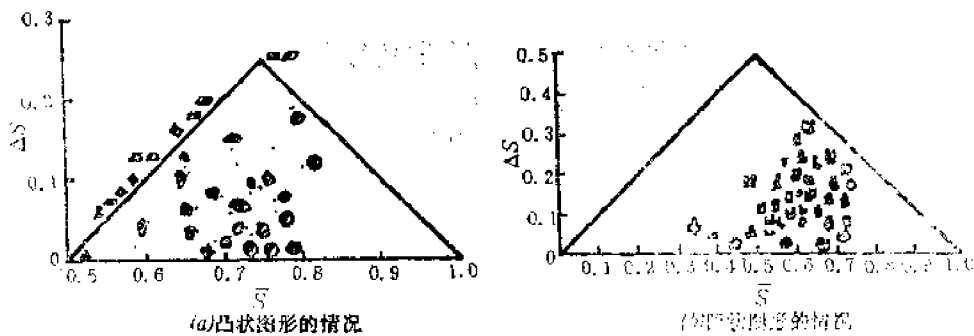


图4-29 在 $\bar{S}-\Delta S$ 平面上各种图形的分布

根据这些形状固有值参数可以识别平面图形。这种方法其识别对象是有限制的，处理工作能得到简单而且高速化，可以说是实用性较高的方法。

二 视觉信息处理的硬件化

在以前的机器人研究过程中所研究的视觉，由简易形开始到有认识图形机能的高级

视觉为止，经过了各种阶段。现在的阶段是，若对象是限定的，就已达到识别某种复杂物体的阶段了。但是考虑对工业机器人的应用，作为视觉输入装置的摄像部已经半导体化，发展成实用的形式了。但是使用视觉处理装置在实际中应用的例子还是不多的，其原因是存在着数据处理的问题。的确，用半导体摄像机本来是比较容易得到图象数据的，但是进行大量的数据信息处理，必须由普通的计算机来进行。但是用这样的计算机进行串联处理时，其处理时间是随信息量成正比例的增大，所以在要求实时处理的问题上是有很大困难的。

近几年，为了解决这一问题提出了一种叫做并联处理的装置，即图象处理的前半部分是提取特征，这时要对大量的数据进行简单的重复计算，对这种计算不使用软件而用硬件来高速地实现。这样的处理装置是机械地处理数据，以提取出必要的图象特征后，再把它们转送到进行更高级的图象分析与识别等计算机中。下面介绍美国顿康(Duncan)等人对这一问题的研究成果。

1. 特征提取的算法

在设计图象处理的专用硬件时，最难的处理算法是由明暗梯度方向的统计直方图(以下简称GDH)提取图象特征。这种计算方法是由图象的明暗信息求出各象素(或象点)的局部GDH，由其直方图的形状提取出对我们感兴趣的对象物的棱角、孔及边界等图象的特征。

(1) 直方图的定义

局部GDH是求出 5×5 的方窗(参照图4-33)内包含的各象点的明暗梯度，按其方向(360°)分成32个区间进行分类，构成直方图。对各象点各直方图是由修正后梯度大小的总和形成的。此直方图就成为图象特征提取的数据了。

(2) GDH的特征参数

由GDH取出的形状特征中，有很多可以表示特征的参数。一般为了决定出有效的参数，对几种形状(角、孔及边界等)经过模拟研究的结果表明，有以下5种参数是有效的。

① 直方图的总和：这是直方图所含值的总和。这个值是表示直方图有足够的大小，用它来检查和评价直方图是否有效。

② 直方图所具有的区间：几个直方图的大小是表示同一方窗中沿不同方向扫描的明暗边界数。由对不同形状的分析可知，特定形状是按直方图区间数进行特征化的。例如有小孔的情况，所有的方向，即在很多区间内有直方图存在；而在直线边界的情况下，只在主要的方向上出现大的直方图。这个参数可由2个级别来评价。表4-1是表示如何以此参数提取不同形状的特征。

③ 第二个峰值对第一个峰值的比：这是表示角特征的参数。角是按由一点延长两个边界来定义的。局部的GDH中出现与此两个边界对应的尖锐峰值。因此通过此比值接近于1假定角的存在。

表4-1 形状与直方图的区间

形状特征	直方图的区间	
	下位峰值	上位峰值
角	10	5
孔	3	15
边界	3	0

④ 第三个峰值对第1个峰值的比;此参数用于识别角与孔的一部分。对孔的一部直方图如图4-30所示。加入判断角的两个大峰值后,存在明显的第三峰值。

⑤ 第一峰值与第二峰值存在的方向间隔:此间隔的定义,当检测角时必须有两个不同的边界,它就是表示与此两个边界相对应峰值离开的最小距离。

2. 制作GDH的硬件

在实现算法硬件化时,从处理的效率和降低成本等条件出发采用管线结构。通过把处理速度慢的部分再分割下去的办法以提高运算速度是这种方法特点。

GDH的硬件化条件如下:

- (1) 使用一般的IC片,
 - (2) 图象数据只限6位的明暗信息,
 - (3) 图象数据暂时存入主计算机,然后送入图象信息处理器。
 - (4) (3)的转送非同步进行,这是使图象信息处理器达到最高速度所必须的。
- 没有GDH,或GDH区域很小时不进行处理,只在必要的区域处理。

管线处理是以GDH为基础的算法,按下述的5个阶段进行(梯度计算、制成GDH、增大GDH、GDH的评价、与主计算机交换信息),下面对此5个阶段分别加以说明。

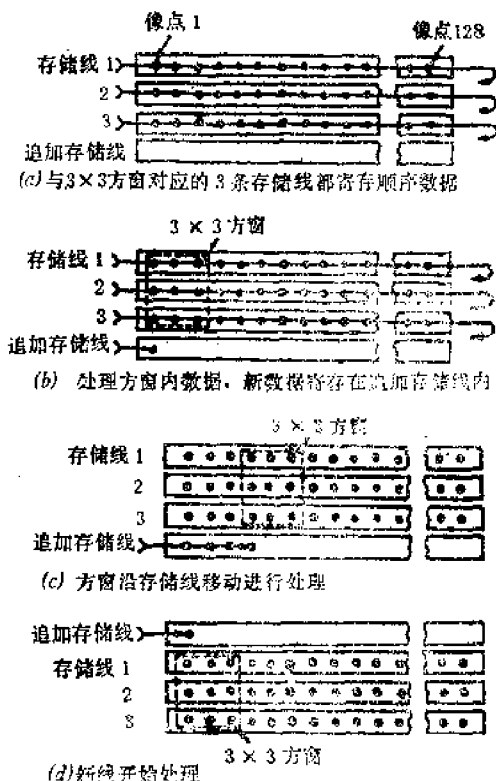


图4-31 象点的处理顺序

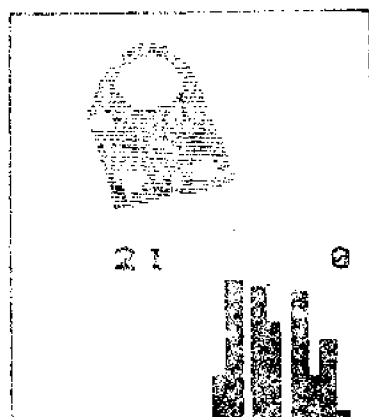


图4-30 与孔的一部相对应的直方图

(1) 梯度计算

对各象点求出明暗梯度的方向、强度和加修正的强度。这一方窗是用 3×3 象点。首先把摄象数据存入按顺序循环的缓冲存储器。一线存储的大小是与一摄象线中的象点相等,其线数是方窗中包含的摄象线数加1。也就是说,一线128个象点,对 3×3 方窗由4个128x8位RAM组成缓冲存储器。

其动作如下:数据按顺序存入3个存储线中(图4-31(a)),进行求取 3×3 方窗梯度运算的同时,把新的数据依次存入增设存储线中(图4-31(b),(c)),当第一条线处理完了时,方窗返回到左端,移到这条存储线的下方。因此,第一条线的存储就空出来接受新的数据(图4-31(d))。把这一系列处理继续进行下去。

处理工作首先是由存储器内的 X, Y

分量的相减运算求出各方向上的明暗变化 $\Delta g/\Delta x$, $\Delta g/\Delta y$ 。明暗梯度的方向是 $\theta = \arctan^{-1}(\Delta g/\Delta y/\Delta g/\Delta x)$ 。此计算是通过查 4K-ROM 的对应表来进行的。同样, 使用另外的对应表选择与 $(\Delta g/\Delta x, \Delta g/\Delta y)$ 组对应的修正强度。这样的修正是根据图 4-32 所示的曲线控制明亮度饱和的象点而得出的效果。这样求得方向 5 位, 修正强度 3 位时, 就把数据送到下一个处理阶段。

(2) GDH 的结构

直方图是把 5×5 方窗内包括的所有象点的梯度作出来, 送给方窗中心的象点。为了使用 5×5 的方窗需要 6 条线的存储器。在此为了作成处理的第一阶段的 GDH, 可由下面的 5 个步序组成。

- ① 要使 32 个 8 位寄存器扫零;
- ② 由缓冲存储得到梯度数据;
- ③ 分解成方向与强度的数据;
- ④ 在方向数据分解区间的现在值上叠加修正强度值;
- ⑤ 处理 5×5 方窗内所有数据。

进行上述的 GDH 修正之后, 依次作出相邻象点的 GDH, 即由注目的 GDH 减去左方的数据, 加上右方的数据 (图 4-33)。将这一操作一直返回到另一端。这一加减处理是以直方图控制逻辑进行。与计算各象点直方图的同时, 所有直方图的总和也就可以求得。

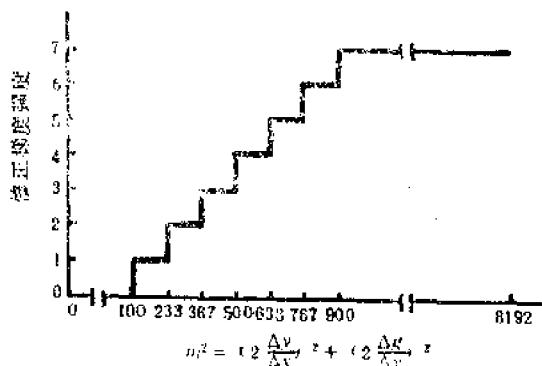


图 4-32 明暗梯度强度的修正

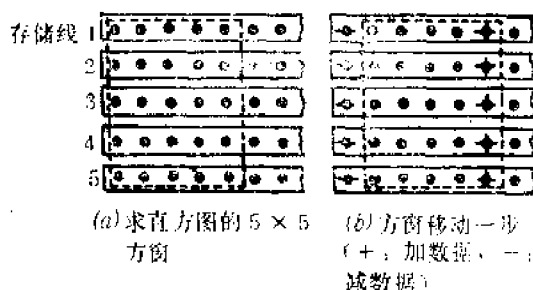


图 4-33 作成 CDH

进行 GDH 的第二阶段修正。这是把 GDH 变成与方窗一边长度成比例的值。

(3) GDH 的放大

这一处理分为峰值放大与峰值取出两部分。峰值放大是使角度量化而产生的误差为最小之后, 为使评价 GDH 必要的第一、第二与第三峰值起主要作用而进行的。这一问题, 是在对象的边界与区别方向的边界非常接近的梯度方向时发生的。即由于微弱的噪声, 将发生数据进入两个相邻区间内的现象。为解决这个问题, 提

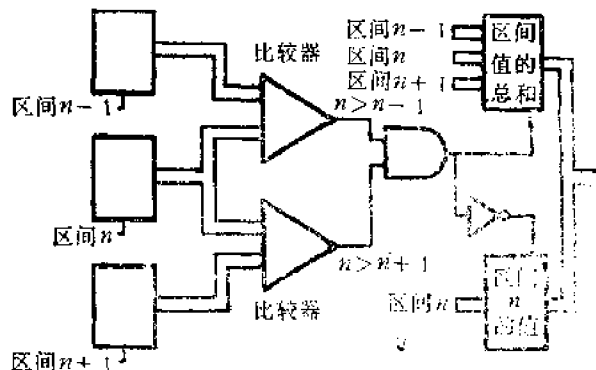


图 4-34 直方图峰值放大回路

出了几种方法，对此图象信息处理器，是以相邻两个区间的值评价此一个区间的的数据的方法。如图4-34所示，我们注目的区间的的数据比相邻区间的的数据小时，就以3个区间的和代替其值的方法。在此处理硬件化中，使用两方向位移寄存器。另外峰值位置的检测是使用软件。

(4) 用GDH识别

为了按第一、第二与第三峰值的位置及其数值取出其形状，以前面特征提取的算法中介绍的参数值进行评价。在此同时进行3步处理。

- ① 把有直方图的方向区间数与临界值进行比较，
- ② 求出第二、第三峰值的比并加以评价，
- ③ 求出最小峰值离开距离并加以评价。

如果所有参数都能满足，就可求得形状的位置点，把此点的信息送往主计算机。至于要求什么样的形状，在开始处理之前，把参数加给图象处理器就可以了。主计算机是监视特征提取处理进行情况的，如特征已取出时，则接受其信息进行更高度的处理。

三 触觉信息的处理

作为触觉信息处理的例子，介绍最近在国际会议上发表的一篇文章的大致内容。它是握紧动作认识物体的语言近似法。这是以有5个手指的手把持对象物，利用手指的位置与手掌中的接触传感器认识对象物三维形状的方法。

图4-35是手的结构图。有5个手指，在各手指的关节中装有检测角度的电位计。在手掌中，直径为1mm的接触传感器单元，以3.2mm的间距共计配置了659个。此接触传感器使用导电橡胶制成，是应用压力变化引起电阻变化的特性。

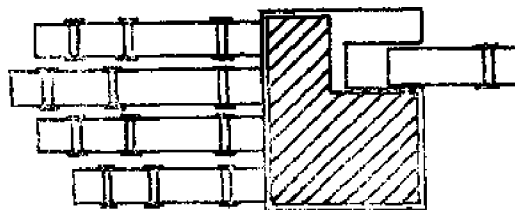


图4-35 手的结构

由于采用了这些传感器，可以得到对象物与手部间的信息，手各部分的位置信息，即可得到对象物表面形状的近似值。根据这些信息，可识别对象物是什么物体，但此论文中这些处理是按语言处理法进行的。

其基本原理简述如下。

- (1) 处理系统是多层次的结构。
- (2) 在各级使用的形式语言是不同的，级位越靠前语句越短。
- (3) 最前位一级只用一个语句构成，每个语句表示相对应的对象物。
- (4) 各级由下面三个阶段构成。
 - ① 生成阶段：根据低位级的记述结果构成新的记述，对最低位而言，是用最简单的分类方法构成记述。
 - ② 语言语法分析：进行记述文法的检查与修正。
 - ③ 意义分析：由物理与几何学观点检查记述的意义。
- (5) 各级中的三个阶段也配置在把意义分析作为上位的阶层结构上。

(6) 在各阶段, 其生成规则、非终端记号及规则适用条件等方面是有差别的。

(7) 在下位级的记述结果作为各级可传递的信息使用, 不论在哪一级或阶段都可进行修正。

实际的手部动作如下。

- (1) 初始状态手掌与手指完全张开。
- (2) 如与对象物接触时, 维持接触状态先把接触点移动到预先决定的区域。
- (3) 按下述规则开始把持动作。
 - ① 关节按次序一个一个地运动。
 - ② 关节的动作一直持续到手指与物体接触或达到最大角度。

实验中, 认识系统由下述 2 级构成。

- (1) 第一级分成如下两个子系统。
 - ① 手指位置信息处理系统 (子系统 I) ;
 - ② 接触传感器输出处理系统 (子系统 II) 。
- (2) 在第 2 级形成最后结果的记述 (子系统 III) 。

作为对象物, 可使用各种大小的棱柱体、圆柱、球、圆锥和四角锥, 为了开始时学习系统, 对每个物体进行 20 次, 共计 100 次的把持动作实验。然后进行实际把持动作, 其识别结果记于表 4-2 中。最后的正确率为 97%。表中 GGML 是表示最优生成文法, GSA 是意义分析文法。

表 4-2 模式识别的结果

对象物的种类	模型数	正确的记述 (子程序 I)		整体的结果 (子程序 III 的输出)		
		GGML 输出	GSA 输出	正确	错误	不清楚
四角锥	20	20	20	20	0	0
圆锥	20	20	20	20	0	0
圆柱	20	19	20	20	0	0
球	20	19	20	20	0	0
棱柱体	20	9	16	17	1	2

§ 4-5 传感器的实用例

一 焊接的自动化

工业机器人的使用部门之一是焊接自动化。焊接的方法很多, 在金属, 特别是钢件的焊接中, 主要是使用电阻焊接和弧焊接。电阻焊接中典型的方法有焊薄板的点焊。例如在制造汽车壳体时, 多用点焊接。

用机器人进行点焊, 目前在技术上可以说没有任何问题。主要问题有以下两点:

- ① 被焊接物的定位精度,
- ② 机器人的手部作为焊枪能否正确地接近焊接位置。

焊接作业是在恶劣环境下的重复作业或是连续作业, 特别是一种工件的大量作业或长大工件的焊接作业更是这样。因此这些作业更渴望实现自动化。弧焊的作业环境是恶

劣的，有噪声、气体、热、强光和焊花飞溅等。

为了实现上述的弧焊作业，必须正确跟踪弧焊位置。进行弧焊时必须将两金属端部切口，以便使两者对合起来形成可容纳熔化金属的沟槽。此切口叫做焊缝坡口（图4-36）。

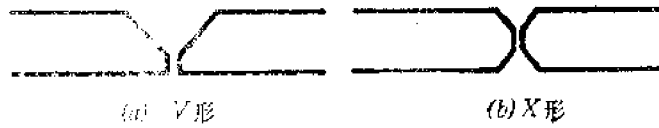


图4-36 弧焊接合部的坡口形状

金属接合部的形式如图4-37所示。

由于弧焊的对象多数是重的物体，坡口有时不能进行正确的定位。因此，除了尽量使坡口定位准确之外，还须设法检测出坡口位置之后沿它移动焊枪。其方法有接触型与非接触型，还可为预先教给位置的示教型与实时跟踪坡口位置的跟踪型两种。弧焊自动化的理想方法是非接触型与跟踪型结合起来用实时非接触型传感器。

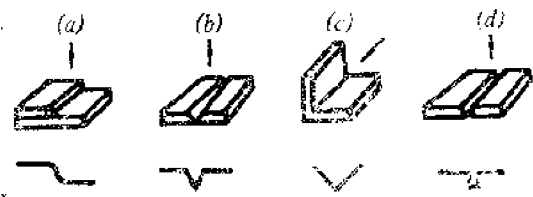


图4-37 弧焊接合部的形式

为了采用实时非接触的传感器，特别是在可靠性与价格方面有困难，所以到现在还没有达到实用的程度。但是在1981年秋召开的第11届国际工业机器人讨论会上，开始出现了实用的机器人用弧焊传感器系统。

二 弧焊用传感器

作为实时且非接触跟踪弧焊坡口位置的传感器有距离传感器与图象传感器。用距离传感器的典型例子，是非亚特工厂研制的把4个磁式距离传感器并列的方法(图4-38)。

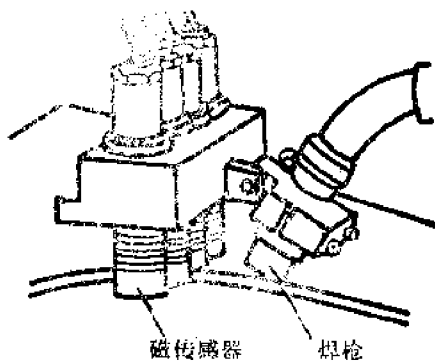


图4-38 磁式传感器跟踪坡口

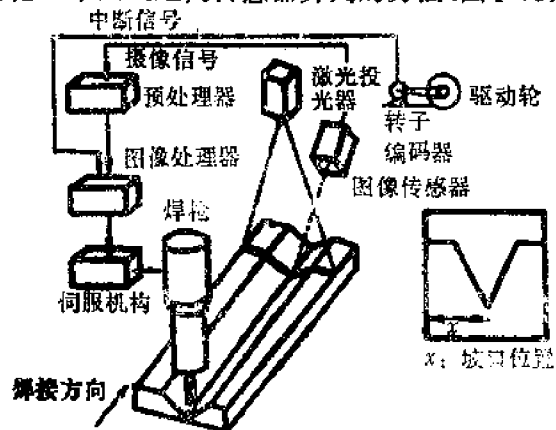


图4-39 以视觉传感器跟踪坡口(1)

但是这种方法焊接位置与传感器间的距离最大只有2cm，所以焊花易附在传感器表面上，从而使传感器的精度降低，这是很大的缺点。为了消除此缺点要设法以视觉的方法构成传感器，这样的传感器日立造船和小松制作所于1979年就开始制造出来了。

图4-39是日立造船提出的方法。此法使用激光射线投光器与电视摄像机。因为这种方法可使传感器远离焊接部位几十厘米，所以易于避免由于焊花飞溅造成的事故。但是这种方法有三个缺点，即成本高、尺寸与重量大，此外还有图象处理困难。

另外小松制作所研制了用红外线的方法也是在图象处理技术上有困难。

下面介绍三菱电机的方法。这种方法的难点有可能解决，所以它颇引人注目。

图4-40是三菱电机的弧焊机器人用视觉传感器的原理图。基本上与图4-39所示的方法一样，是把投射在坡口处的光通过斜方向的扫视，识别V字形的象，以此知道沟部的位置，依此来修正焊枪路径的方法。但是光源是用LED的闪光，将其平行化后用镜对平行光扫描。把被扫描的光照射在焊接金属上，通过半导体位置检测器将其反射光变成2维的象求出来，以此计算坡口位置的偏移量（图4-41）。这一方法基本上与识别3维物体的方法是一致的。

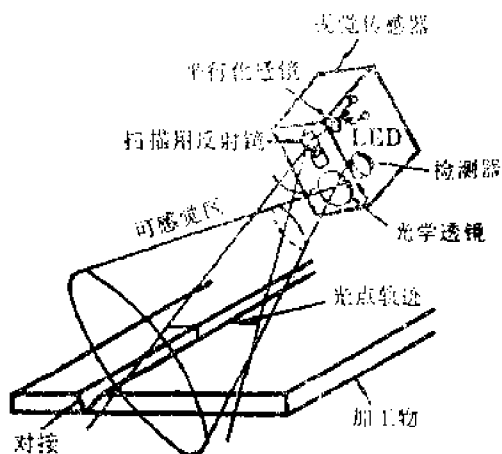


图4-40 以视觉传感器跟踪坡口(2)

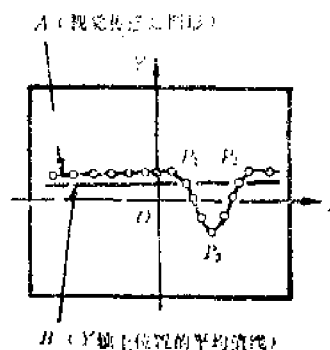


图4-41 由视觉传感器得到的图像

高输出的红外线LED是以10Hz进行了调制。其反射光（瞬时的点信息）的X、Y位置是作为模拟电压信息由半导体位置检测装置而得到的，此电压通过电流—电压转换器变成电流。这时由带通滤波器除去噪声。这时得到的曲线如图4-41所示。

其次用弧焊视觉系统最实用的方法加以评价的是图4-41中由A线求得坡口的偏移，其作法如下：

- (1) 计算扫描Y轴点位置的平均值（图4-41的线B）。
- (2) 求出平均线B与波线A的交点 P_1 、 P_2 。
- (3) 求出最远点 P_3 。
- (4) 如 P_3 在 P_1 与 P_2 之间，求出表示坡口位置的点 P_3 。

如上所述，使用平均线的方法，即使平均线被噪声干扰，也易于求出焊接点。这种方法也适于其它焊接方法。例如，图4-37(a)的情况，焊接位置是平均线与波形线的交点，同样，图4-37(b)的情况，可求出两交点的中间。图4-42是此传感器系统的处理流程图。

此方法的特点是对消除噪声能力较强，即使被焊接金属表面锈得很重也能正确地知道其位置。图4-43(a)是以白纸模拟坡口而作成的情况，(b)是锈铁的输出之例。

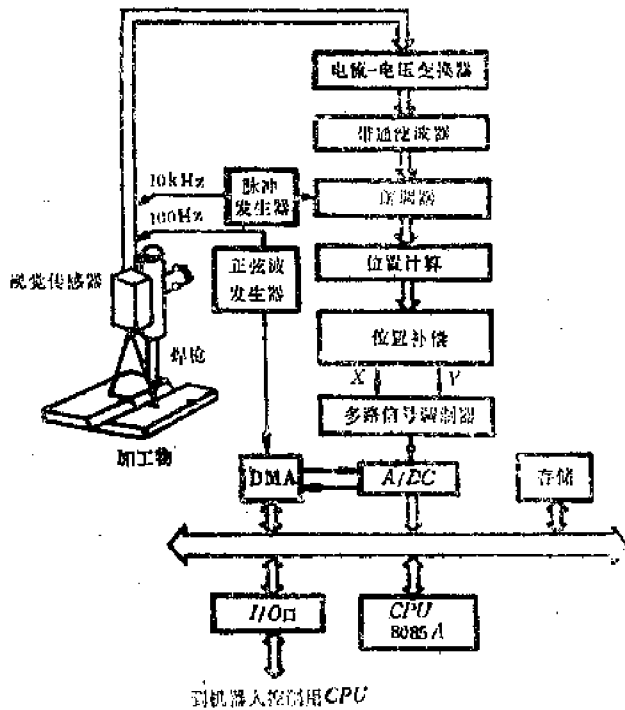


图4-42 弧焊机器人用视觉传感器的流程图

用此传感器系统检测的焊接位置结果如图4-44所示。

此传感器系统的另一特点是可以计算出传感器与被加工件的距离。图4-45中，可由光轴的中心O与波形线同Y轴的交点B间的距离Y。计算出此数值。

图4-46是将此传感器作为传感器与加工物间距离的测定器使用时所得的结果。即使加工物表面是波形起伏的，由于使用此传感器系统，可根据其波状起伏的轮廓使焊枪位置作上下运动以跟踪焊缝而进行弧焊，可实现高精度的焊接作业。

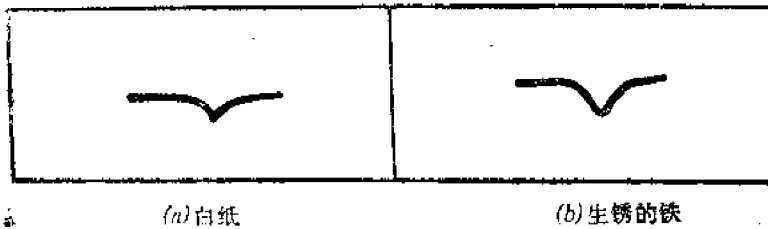


图4-43 以视觉传感器测得的坡口图象

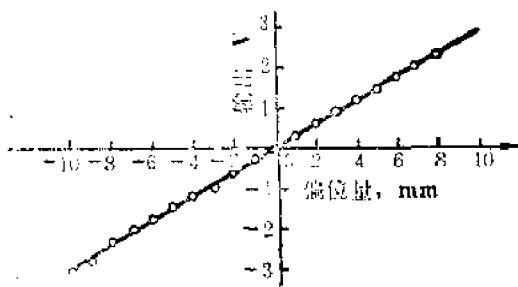


图4-44 以视觉传感器系统检测的坡口位置数据

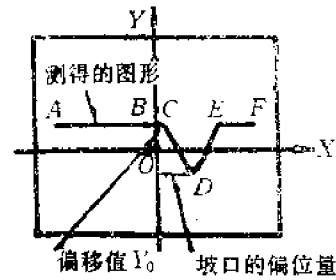


图4-45 求坡口偏移量与传感器到加工件距离的方法

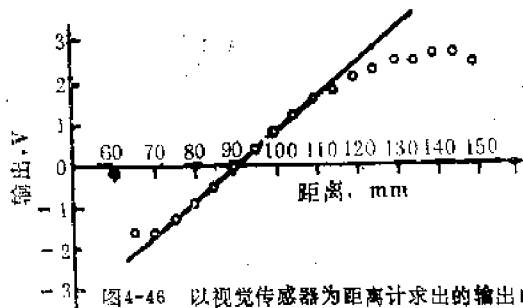


图4-46 以视觉传感器为距离计求出的输出电压

第五章 机器人与人工智能

§ 5-1 机器人与智能

智能机器人，头脑的机能是最重要的中心部分。计算机不单纯是处理传感器信息之后去控制执行机构，而在人工智能的范围内进行学习或推论以及理解自然语言等高级机能。

人工智能的研究是随着计算机科学的进步而发展起来的，多半是注重在软件方面。运算处理基本上是用大型计算机或特殊计算机，如对移动机器人使用这样的计算机必须要装设很多通讯用的电缆，这就缺乏实用性了，目前还没有从实验室研究的状态解脱出来。为组成实用的智能机器人，如何将有关人工智能的研究成果用于机器人的控制中还是个问题，在开发高性能计算机软件的同时，开发能搭载在机器人上的小型软件系统也是很重要的问题。

图 5-1 是智能机器人控制系统的原理图。

智能机器人必须能够按人的简单命令自动地进行某种作业。人给机器人的命令是使用自然语言较方便，所以机器人应该能认识声音、解释语言理解工作的目标，假定问题或一系列作业手续的规划等。对于未知的状况，能够根据过去的经验或输入的信息，通过学习与推论加以解决。

当每个作业内容决定之后，对下位的控制系统给定更具体的命令，结果使机器人利用视觉或感觉等传感器的信息而控制机械手的位置或产生力而进行作业，此外还控制脚或车轮向目标场地移动。

另外，人类是通过感觉器官而取得信息的，将其处理后的数据再更新，以此结果使肌肉等运动，维持生命或进行本能动作，为了更好地生存下去完成适应的行动或创造行为。完成上述作用的中心是以脑为中心的神经系统。

由于脑的作用，人类可进行编写计算机程序、求解数学题、理解语言等高级的神经活动，或进行驾驶汽车等复杂的操作。但是随着过去几十年计算机科学的飞跃进步，出现了代替上述复杂操作的计算机。可以进行故障诊断，确定复杂的有机化合物的分子结

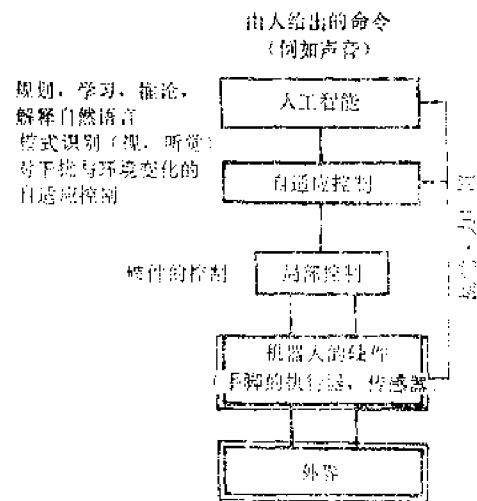


图 5-1 智能机器人的控制系统

构或解不定积分以及进行代替人的各种高级操作的一部分等。这样的系统，在某种意义上说是具有人工智能的。

§ 5-2 人工智能及其有关的研究

对人工智能的研究一般没有统一的方法，可以说是经验性的，针对具体问题进行的，到目前已开发了各种系统。下面只介绍部分与机器人控制有关的研究课题。

一 学习机械

按心理学的说法，当生物体的行动依经验而改观时，则称此行动的改观为学习。另外，以神经回路网为模型的模式分类机械，它是工程技术范围内学习机能的原型。

为了说明模式分类机械的基本原理，在此以使用线性识别函数的学习机械的参数修正方法为例加以说明。

图 5-2 是模式分类的基本模型。这里把 d 维向量 x 称为模式向量，其元素表示为分类数据的集合。比如将模式分类用于天气预报时，则 x 的元素是 x_1 ：气温， x_2 ：气压， x_3 ：风速，……等。 i_0 是输出值，输出与分类区域相对应的数值。如为天气预报时， i_0 ：预报，1：明日晴，2：明日雨，3：不能预测等。 $g(x)$ 是识别函数，线性识别函数时，使用加权系数 w_i 后，按下式定义：

$$g(x) = w_1 x_1 + w_2 x_2 + \dots + w_d x_d + w_{d+1} \quad (5-1)$$

方程式 $g(x) = 0$ 表示决策面。

为了使说明简化，下面研究把两个元素表示的模式分成两个区域 \mathfrak{K}_1 与 \mathfrak{K}_2 的模式分类器。因为此模式可用 2 维平面上的点来研究，可用图 5-3 表示。

若是 \mathfrak{K}_1 、 \mathfrak{K}_2 两区域可以直线分割时，即当满足下式的 w_i 存在时， \mathfrak{K}_1 、 \mathfrak{K}_2 是可线性分割的。

$$\left. \begin{aligned} g(x) = w_1 x_1 + w_2 x_2 + w_3 > 0 & \quad x \in \mathfrak{K}_1 \\ g(x) < 0 & \quad x \in \mathfrak{K}_2 \end{aligned} \right\} \quad (5-2)$$

模式 \mathfrak{K}_1 、 \mathfrak{K}_2 可线性分离时，在学习过程中用 N 个模式向量，求取满足式 (5-2) 的识别函数，即求取 w_i 的学习算法如下：

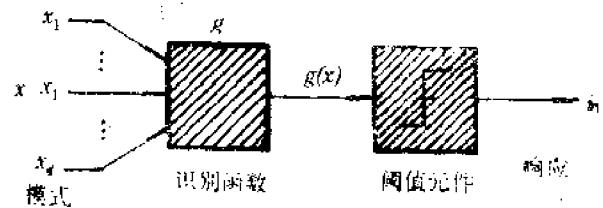


图 5-2 模式分类器的基本模型

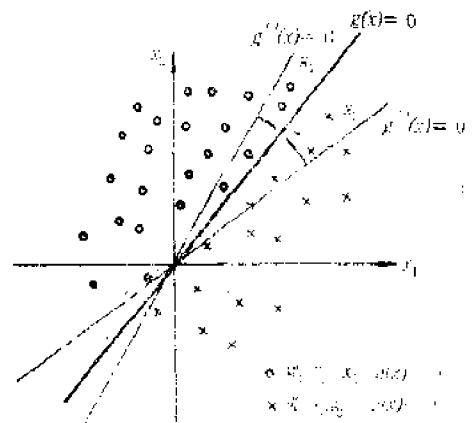


图 5-3 模式分类的简例

- ① 给 $w_i^{(0)}$ 以适当的初始值 (如 $w_i^{(0)} = 0$)。
- ② $k := 1$ 。
- ③ 求 $g^{(k-1)}(x^{(k)})$ 的值, 如能进行正确的模式识别, 则转向⑤ ($x^{(k)} = (x_1^{(k)}, x_2^{(k)})$ 是第 k 个模式向量)。

- ④ 按下式修正参数 w_i 的值。

$$\left. \begin{aligned} w^{(k)} &= w^{(k-1)} + c y^{(k)} & x^{(k)} \in \mathfrak{X}_1 \\ w^{(k)} &= w^{(k-1)} - c y^{(k)} & x^{(k)} \in \mathfrak{X}_2 \end{aligned} \right\} \quad (5-3)$$

- ⑤ $k := k + 1$ 。
- ⑥ $k \leq N$ 时转向 3。
- ⑦ 終了。

在式 (5-3) 中 $w^{(k)} = (w_1^{(k)}, w_2^{(k)}, w_3^{(k)})^T$, $y^{(k)} = (x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, 1)^T$, C 是正的常数。又 $g^{(k-1)}(x)$ 是以参数 $w^{(k-1)}$ 表示的识别函数:

$$g^{(k-1)}(x) = w_1^{(k-1)} x_1 + w_2^{(k-1)} x_2 + w_3^{(k-1)} \quad (5-4)$$

以上的方法, 在学习过程中输出结果的正确和错误与否是教给系统的, 所以称为有教师的学习。

另一方面, 学习系统的希望响应有时是未知的, 这样的系统叫做无教师学习或称为自学习系统。自学习, 由于为了使系统的性质变化, 学习系统的误差是不能利用的, 所以其学习只能根据当时的状况或观测结果来进行。比如, 引入一个估计某种分类性质的平均损失函数, 使此函数为最小去调整参数。

作为将模式分类方法实际用于机器人控制中的例子, 是在 § 2-5 中介绍的有关假肢的学习控制研究。此外还有将参数修正算法用于机械手位置控制的研究。

二 生成系统

生成系统是为了将人工智能中解决问题的过程模型化, 是由聂维尔与西蒙提出来的。

所谓生成系统, 象「若为红灯时停止」, 「若为绿灯时前进」一样, 是表示「若……, 则是…」的描述意义。即生成系统是由数据库、生产规划与控制程序组成的系统。

生成系统的基本算法可按下述形式加以描述。

生成系统的处理程序:

- ① DATA ← 数据库的初始值。
- ② DATA 在满足结束条件之前继续进行以下的处理:
由适用于 DATA 的条件规律集合中选出某一规律 R,
DATA ← DATA (按规律 R 得出的数据)。
- ③ 结束。

以上述的处理程序, 进行某种实际作业时, 规律的选择方法是个重要问题。选出规律, 保持已试探过的规律或新作出数据的过程是构成对生成系统的控制方法。在控制方法中有可变更的方法与试验方法两种。前者的例子是引入某一个目标函数, 用它以最大

倾斜法求出极值的登山法。后者是适用规律之后其结果并不理想时，返回到前一个状态的路径返回法，以及将一连几个规律的适用结果同时记录下来的图解探索法两种。

在此以简单的8位置难题求解为例。所谓8位置难题是在 3×3 的游戏方格中放入1~8的数字块，由某一初始状态开始到指定的排法目标为止，进行数组变换排列的游戏。如图5-4表示的为初始状态，B是最终状态。数字块可向前后左右的空白方向移动。

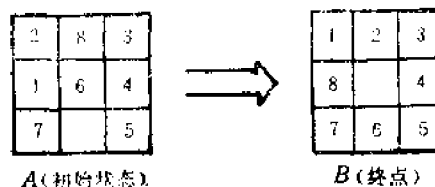


图5-4 8位置游戏

在人工智能中，如何表现问题的描述方法是非常重要的。由于描述方法的不同，可能使问题变得复杂。8位置游戏问题中可实现的状态数有362880 ($9!$)个，但是这还是在游戏中要处理的较少的问题。最简单的状态描述方法是由1到8的数字以 3×3 的矩阵表示。另外，由某一状态到另一状态的转移，可以把向前后左右4方向的任何一方移动的问题以简便的方法描述。

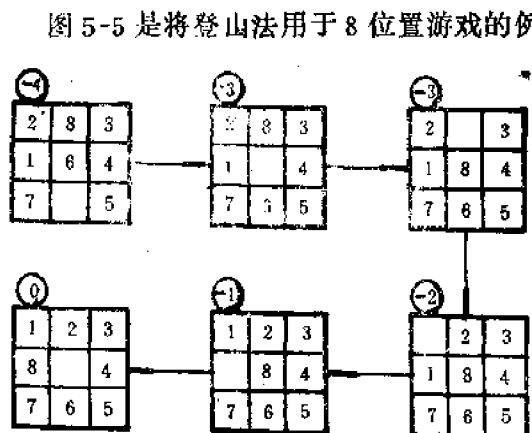


图5-5 登山法的例子

配置的位置不正确时数字的个数以负数表示。这时，如按此目标函数增加来选择规律时，达到0时就表示到达了目标。

图5-6是上述游戏中的探索实例。粗线表示的顺序即为问题的解。在此把所有的适用规律都网罗进来了。但是一般这种方法将使探索工作量加大，所以并不是有效的方法。利用某种信息，只着眼于与目标接近的部分，集中研究这部分才是明智的。

在下围棋或象棋时，把各种可能的步都一个不漏地研究下去，这时的工作量太大了，实际上是无法作到的。这时，人总是引入某个目标，只是倾向如何使这个目标接近而最终得出结论。如果这个目标适当，这时也会得到正确的结论。这种方法是解决问题的探索方法，其实际应用例子有沙姆耶鲁等人的棋局排列学习程序。

三 联想记忆

人的记忆并不象计算机那样把记忆按地址加以指定，而是以联想的形式进行的。在心理学上联想是指那些已记忆的关系，而新的记忆是在已记忆的关系上加以记忆的。

将联想记忆实际具体化时用相连存储器，这种装置的记忆方式叫做分散型，它有以下的特点。

(1) 即使装置的一部分发生故障，而特定事项的记忆并不消失，只是其记忆内容稍许不确切罢了。

(2) 加入不确定的元素，使相似的事件进行相似处理的能力具有自然发生的可能

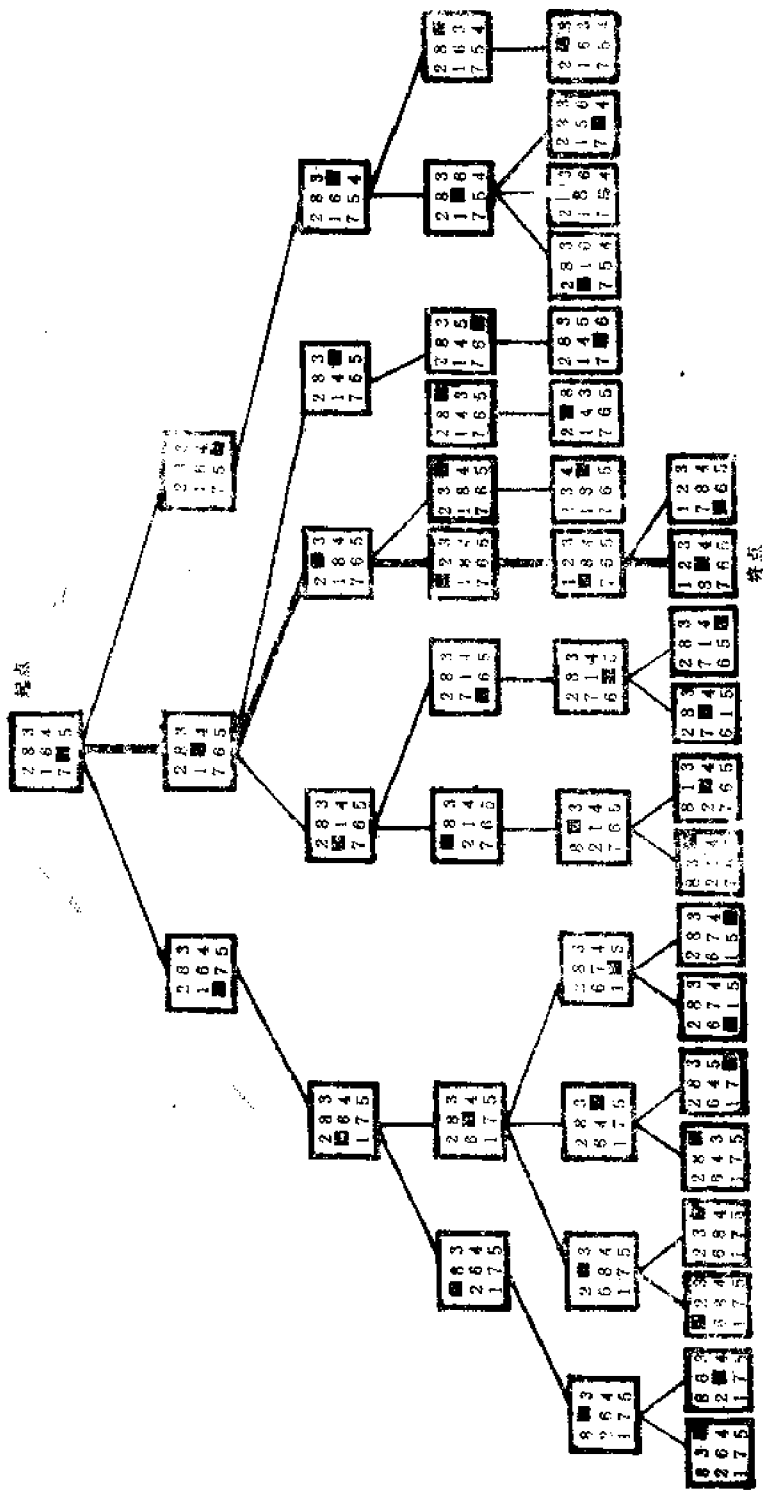


图5-6 搜索过程的...例

性。

(3) 输入输出线只是一个语句，没有象一般计算机记忆装置中的复杂记忆机构或接线就有可能处理很多的记忆事项。

特别是由特点(2)，可以指望得到与人类相近的信息处理的可能性。

相连存储器的模型如下。

记忆事项以下述向量表示：

$$x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}) \quad (5-5)$$

式中 x_{in} 是取-1、0、1的三个值，以-1与1构成模式，0是中间状态。如以 x_i^j 表示将 x_i 转置后得到的列向量，则

$$M = x_1^j x_1 + x_2^j x_2 + \dots + x_n^j x_n \quad (5-6)$$

它是 $n \times n$ 的矩阵，可把它看成是记忆了 k 个记忆事项的记忆装置的内容。其量化关系按下式定义：

$$\Phi(t) = \begin{cases} -1: t < 0 \\ 0: t = 0 \\ 1: t > 0 \end{cases} \quad (5-7)$$

对矩阵 $A = (a_{ij})$ ，按下式扩展后加以使用：

$$\Phi(A) = (\Phi(a_{ij})) \quad (5-8)$$

式中将 $y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ 作为输入进行联想，求出下式：

$$z = \Phi\{y \cdot \Phi(M)\} \quad (5-9)$$

z 是 n 维的行向量，其元素仍然以-1、0、1三个值表示，可以把它看成是由 y 得出的联想事项。当 y 是使 x_i 的一部分元素为0的模式时，可得到 z 就是与 x_i 相近的模式。

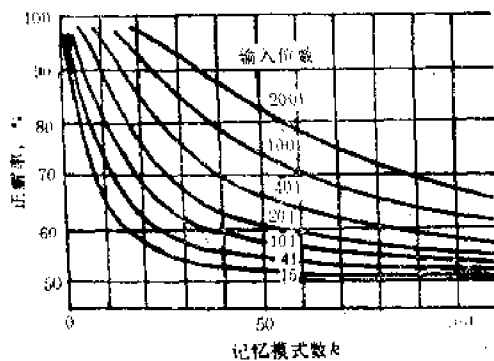


图5-7 联想记忆的正解率

此模型的意义是记忆着记忆事项的自相关，在 x_i 的任意两个元素之间，存在着记忆其关系是同号还是异号的元素。如记忆事项重叠时，其元素在已有的同号或异号中按多数者选取，但是这样的元素集合起来，要看有联想事项 z 的元素是1还是-1进行探索，按少数服从多数来决定。

图5-7是表示此模型由记忆事项的一部分想出全体时，想出部分的任意位数下是正确的概率。为了得到高的正解率，能记

忆的模式数是有限的，但是它不拘泥于以往的记忆装置概念，即使允许记忆不太正确时，则它可以记忆相当多的事项。

§ 5-3 机器人回避障碍物与动作规划

一 前言

作为把人工智能用于机器人控制的例子，SRI的机器人Shakey是较有名的。对周

围的情况通过视觉加以认识，规划机器人的动作，然后进行控制，进行实际作业。

下面简单介绍机器人移动或进行作业时，同环境周围物体的干涉问题。

这个问题并非机器人独有，例如在CAD中，用计算机进行设计时也会发生。即设计的复杂3维形状零件，在实际中能否进行安装，这是3维间的干涉问题。

与机器人有关的问题，是移动机器人根据外界的信息，自动地回避现场障碍物而确定行动路径的问题。再有，机械手进行作业时，一边回避障碍物一边寻找自己的轨道，移向目的物所需的位置和姿势，这两个问题是到目前一直在设法解决的主要问题。不论哪个问题都是根据得到的信息，一边回避障碍物同时决定由起点到目标地点的最佳路径，比如按距离最短或能量消耗最少来确定路径。

此外，在机器人中也有近似于上述CAD中静的物体间的干涉问题。这就是人操纵机械手时进行包括途中轨道在内的操纵作业，或进行两个腕的协调动作时的情况。在这样的控制中，在各时点首先根据作业的需要给定机械手位置的指令。因此，有必要在进行实际动作之前检查一下给定的位置与姿势是否会与其它物体或自身的其它手臂产生干涉。这种检查方法可应用CAD中所用的方法。

下面介绍移动机器人回避障碍物与路径选择的例子，以及机械手作业中解决这类问题的最新研究成果。

二 移动机器人的路径确定

机器人从操作者处接受指示目标地点的宏观指令，为了按此指令而行动，最大限度地利用外界的信息，而确定出最佳路径是非常重要的。

决定这样路径的例子有§5-3节中所介绍的SRI（斯坦福研究院）的Shakey机器人。它是摄象机与装在本体上的触觉传感器作为收集外界信息的感觉器官。另外还有行走的车轮，在走廊和门连接的房间内移动。房间内放置有立方体或楔形的箱子，Shakey把各箱体作为障碍物加以回避，一边规划自己的路径一边向目标地点移动。此机器人的规划是按称为STRIPS的解决问题的程序进行的。此研究是集中在人工智能中极待解决的课题上，所以是非常先进的研究内容。

另外在JPL（喷气发动机实验室）对以探索行星为目的的移动式机器人的研究也有相当的进展。在远离地球的行星中，传递信息是相当费时间的，操作者逐次给机器人指令是困难的，在某种程度上机器人能自动地活动是很重要的。

JPL的机器人根据对图象的分析而构成外界的模型。这时，如图5-8所示，把地表面分成可通过的区域，不可通过的区域及未知的区域3部分。其次，按这些信息通过称为“人行道”的路径规划算法确定路径，以得出的路径反馈式控制来实现。

下面简述此路径的确定方法。

1. JPL移动机器人的路径决定法

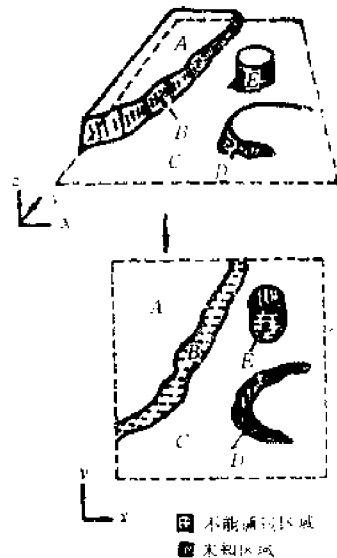


图5-8 地表面的模型

在外界环境中，为了存储容量与探索路径的简单化，将区域分割成3m正方的部分，每个部分都构成一个模型。对各个区域，将通过工业电视等得到的信息进行图象分析处理，并把它分成上述的三种区域。后者的两个区域可近似地以多角形来表示，实际上可以用各顶点构成的肘杆来表示。但是必须考虑横跨相邻肘杆的障碍物。探索路径是把起点与目标地点用直线连接起来，然后依次研究被路径穿过的各部分。为了在可能的路径中选出一个作为目标函数，在此选择的是距离。为了得到真正的最佳路径，各区域内的所有障碍物必须是已知的，但是作为初始状态，从机器人的视野来看，还存在未知的区域，可将它看成是障碍物。这样的行动，对外界是悲观的或消极的应付，主动而积极的办法是必须接近未知的区域，对外界观察之后修正现有的模型，然后再进行新的探索。作为研究的第一步，不考虑机器人的大小，只把它看成是一个点。

实际探索路径时，按如下方法进行。假定在地图区内由多角形顶点组成的集合为V，不可通过的壁（障碍物的边）的集合为W。

$$W = \{A_1B_1, \dots, A_nB_n; A_iB_i \in V, A_iB_i \text{是多角形的边}\} \quad (5-10)$$

再假定把起始地点与目标地点集合加在V中的集合为P。对P内各点 P_i ，以杆 L_i 定义。

$$L_i = \{P_iP_j; j \neq i; P_iP_j \in W, \text{或 } P_i \in V \text{ 并且 } P_iP_j \text{ 与所有的多角形无干涉}\} \quad (5-11)$$

L_i 是与 P_i 连接的壁或由 P_i 到另外点的杆长。因此到P内的点Q的路径是下述连杆的肘杆：

$$(P_{k_1}P_{k_2}, P_{k_2}P_{k_3}, \dots, P_{k_{n-1}}P_{k_n}) \quad (5-12)$$

式中 P_{k_1} 是起始点， $P_{k_n} = Q$ ， $P_{k_i}P_{k_{i+1}} \in L_{k_i}$ 。

探索是从目标点开始逆行。即对于到达目标地点的杆 $P_kP'_k$ ，研究其与集合W的干涉。是否 $P_kP'_k \in W$ ，只要 $P_kP'_k$ 与壁不交叉，就把 P'_k 作为下一个节点。若与壁 A_iB_i 交叉时，则将 P_kA_i ， P_kB_i 的连杆作为下一个候补加以研究。作为目标函数，以探索得到的距离到目标地点的直线距离差的总和来进行。其次的问题在于此评价方法陷入迷途时，即必须取远离目标

地点的路径时，还是否有效。这时必须进行边走边寻找壁的探索。如图5-9所示为简单的探索例子。在此不拟作详细的介绍，作为研究的第2阶段，要考虑到机器人的大小。

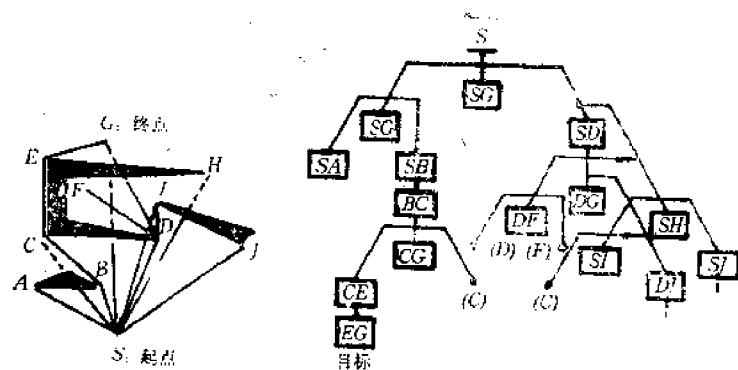


图5-9 路径探索例 (A~J:途中的目标点)

2. HILARE机器人的路径确定法

下面介绍用于研究机器人各种机能而研制的法国机器人HILARE的路径探索。

图5-10所示的机器人其本身没有任何具体的使用目的，只是用来研究机器人各种技术用的。此机器人其中心部分是使用微机与多个微处理器有多级意向判断机能的。

HILARE 回避障碍物的路径确定方法如下。首先，把外界的障碍物以多角形来定义，作为初始状态是否都是已知的，由机器人来检测。障碍物将其边各按反时针旋转加以记述：

$$Ob_i \{S_1^i, S_2^i, S_3^i, S_4^i\} \quad (5-13)$$

同时，记述各边左端的座标 (X, Y) ，姿势角 ϕ ，长度 r ：

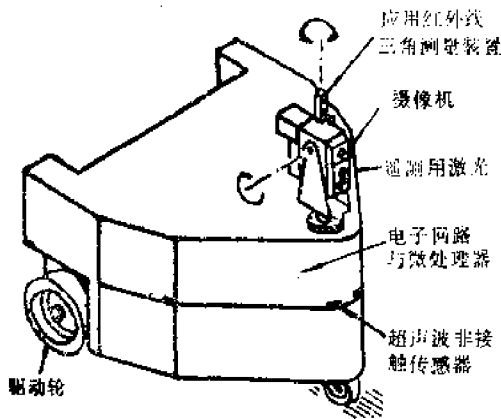


图5-10 HILARE的组成

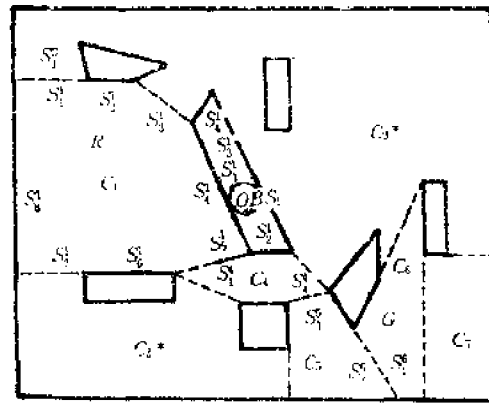


图5-11 外界模型

$$S_i \{ \langle X, Y \rangle, \phi, r \} \quad (5-14)$$

以图5-11所示外界模型为例。

图中的 C_i 等定义为空区域，其各边以顺时针记述。

$$C_i \{ S_1^i, S_2^i, \dots, S_n^i \} \quad (5-15)$$

确定 C_i 的方法如下。取任意一顶点，按顺时针方向边走边找。这时，如相邻两边的交角为 180° 以上时，则转移到交角为 180° 以下，可构成多角形的相邻顶点处。这样，直至得到凸多角形之前要反复进行。在区域内将有可能含有障碍物的用 * 表示，对这些区域也允许不是凸的形状存在。然后组成 3 种区域的连续关系图形。即在相邻区域间，如果机器人不能通过的边用连杆表示时，其图形如图5-12所示。假定起点为 C_1 的 R ，目标地点为 C_6 的 G 时，则可能的路径如下：

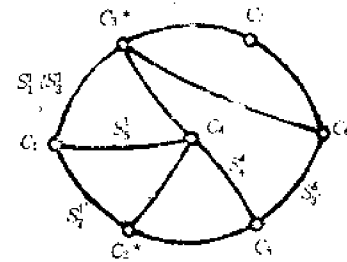


图5-12 区域接续关系图

$$C_1(R) \xrightarrow{S_1^1} C_4 \xrightarrow{S_1^4} C_5 \xrightarrow{S_1^5} C_6(G) \quad (5-16)$$

一般探索的结果，求出多个路径，必须按目标函数选出一个路径。在此，认为 $F = \sum_i (F_1^i + F_2^i)$ (i 表示各区域) 是目标函数。式中 $F_1^i = \omega_1 d_i + \omega_2 |\phi_i| + \omega_3 n_i$ 。 ω_1 是加权， d_i 是路径长， ϕ_i 是路径方向的变化量， n_i 是机器人的停止次数。另外， F_2^i 是用以评价不确实性的， $F_2^i = \omega_4 d_i (I \times V - 1)$ ，式中 $I = S_T / S$ ， $V = 1 / (1 - \tau)$ ， S 是全区， S_T 是 * 区域的总和， τ 是 S_T 中障碍物所占面积的估计值。路径是按上述方法确定的，当外界的信息只有一部分为给定时，HILARE 通过自己的传感器对外界进行检测。

不论上述的哪种情况，都是把障碍物变成 2 维的多角形模型，把机器人本身看成一个点，给定目标函数后而确定路径的。在实际中，是按下节所介绍的方法，正确地考虑机

器人本身大小的同时，还要以其本身的传感器，把得到的外界信息进行怎样的处理之后用以确定路径，这是一个很重要的问题。

三 机械手作业时回避障碍物轨迹的确定

在机械手作业时，确定回避障碍物轨迹的问题，从60年代出现了计算机控制机械手后就开始了。1968年皮波尔最先研究了这一问题，以后帕乌尔(1972)、列维斯(1974)、维道耶斯(1974)继续进行了研究。在此，再介绍尤达帕提出的复杂障碍物回避问题的解决办法，以及从最新论文中介绍培列兹的方法。

1. 计算机控制机械手的冲撞检测及其回避

CIT(加利福尼亚工学院)的尤达帕(Udupa)最先解决了如图5-13所示的复杂障碍物回避问题。

此机械手是有2个自由度的悬臂及悬臂前端装有一个自由度的前臂部组成。机械手的运动以2维来考虑，但也可以扩展为3维。悬臂的2自由度是如图绕O点的旋转和沿O点的滑动。抓取物体的手部装在前臂的末端，但此处省略未画出。图中的S是机械手的开始位置，G是目标位置。问题是使在2维平面上的障碍物不与机械手发生碰撞，确定由S到G的移动轨迹。

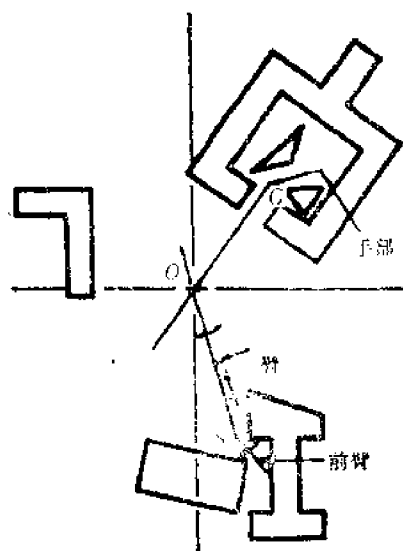


图5-13 障碍物回避问题

一般情况解决这样的问题时，尤达帕是这样考虑的。首先，假定现实的机械手及障碍物是由圆柱构成的杆及多角形加以近似。冲撞的问题就变成了此连杆运动时其通过区域与障碍物的干扰问题了。为了检测此干扰，进行如下的变换。

第一变换，忽略机械手连杆的粗细，假定机械手如图5-13那样，是由线段组成，为此在各障碍物的周围将尺寸扩大机械手半径的大小。通过这一变换，计算机械手运动时通过的区域变得简单了。

为了进一步简化，进行第二变换，即由机械手上取下前臂，为此将障碍物周围扩大到前臂长度的大小。

通过以上的两个变换，确定机械手轨迹问题就不是同扩大了障碍物的干涉问题了，而是变成由S到G的移动问题。因此，轨迹的规则是使用第二变换后的模型决定粗轨迹，然后用第一变换的模型加以修正的方法。但是用这种方法，存在着两者的接续问题，所以并非是很好的方法。于是以第一变换的模型求轨迹，第二模型是简化时使用。轨迹规则按下述三段进行。

(1) 讨论能否实现目标位置，还可用第一变换得到的模型研究干扰情况而简单地进行。

(2) 途中轨迹的确定。

(3) 起始地点, 目标地点附近及障碍物附近轨迹的确定。

对于(2), 在悬臂前端轨迹确定中使用直线近似。例如图5-14所示, 第二变换后求得的可移动区域用虚线表示, 如以 S 、 G 分别表示起始与目标地点时, 首先认为 SG 是轨迹。但是, 如箭头部分所示, 由于偏离了可移动区域, 要重新假定 P , 将轨迹改成 $SP \rightarrow PG$ 。又, 如环境变成图5-15时, 假定 P_0 、 P_1 为辅助终点, 作出 SP_0 、 P_1G 的轨迹, 再作如上图的处理。其次, 前臂的轨迹, 假定悬臂的前端静止时, 它作旋转运动; 悬臂前端作直线运动时假定它取一定的姿势角。悬臂与前臂的运动合成时, 如若由可移动区域出来时, 则修正悬臂端的运动, 一直重复操作直到求出轨迹为止。

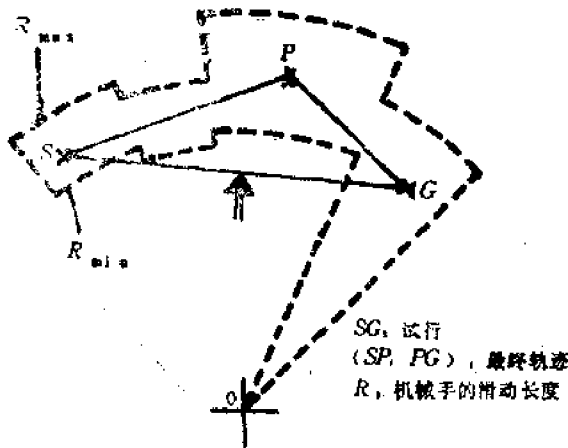


图5-14 辅助终点的假定

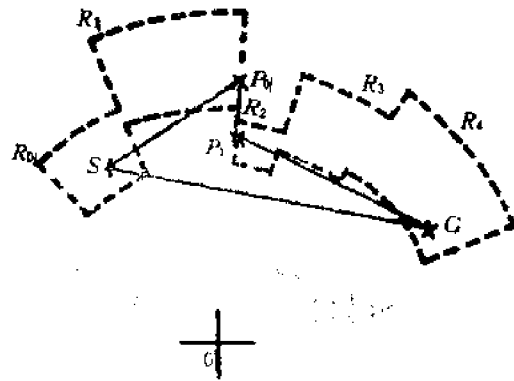


图5-15 辅助终点的假定

如为(3)所示的情况时, 由于前臂与障碍物间干扰所以悬臂的运动容易受到限制。这时的规划可认为有两个状态。一个是使悬臂前端沿前臂的姿势方向进行平移运动, 这时前臂的姿势保持一定的状态。另外做一个叫调整状态, 是使前臂的方向朝向冲撞危险性小的方向的一种状态。在进行这个状态的规划时, 可使用非接触传感器等的信息。

把以上的方法综合起来, 其确定的轨迹如图5-16所示。尤达帕的方法是解决复杂问题的, 但是所得的轨迹未必是最优的。另外在决定轨迹时可采用试凑的方法。

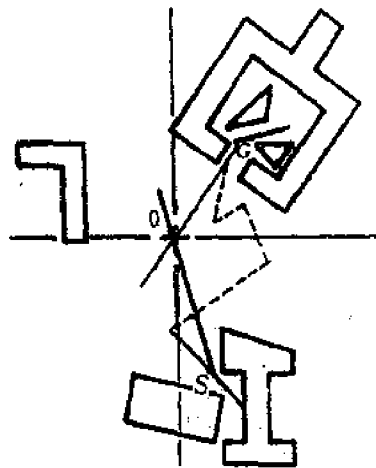


图5-16 悬臂前端的最终轨迹

2. 多角形障碍物间的非冲撞路径规划

关于机械手作业时如何回避障碍物的问题, 首先是由MIT的培列兹进行的。

他在有大多数障碍物存在的区域内, 求出了无冲击移动对象物的最优路线。对此问题的要求有: ① 求出通过包括障碍物附近的安全路径; ② 在某一目标下, 例如以距离为最短的最优路径。其中最简单的方法是扫描区域法。即将初始位置与目标位置用直线连接, 沿此路径移动对象物时, 求出包络对象物的区域。然后检查此区域与障碍物的相贯性。

有相贯时，则把开始的路径向减少相贯的方向加以修正。将此操作反复进行，最后得出路径的方法。但是，这种方法的缺点是路径的修正由障碍物相贯的局部观点出发的，有时很浪费时间。

另外，代替的方法是，为了防止与对象物的冲击，求出不能进入的禁区，而找出满足约束条件的最佳路径方法。尤达帕的方法也是考虑禁区这点与此法相似，但是确定禁区的方法欠准确，另外，确定路径是用重复法，其缺点就是就整体而言不能求出最优的路径。

为了解决此缺点，培列兹提出的方法是在对象物上确定参考点，在障碍物周围确定与此点有关的禁区的同时，将禁区（多角形或多面体）的顶点相互连接，利用由此路径组成的图形求取最优路径。

在考虑障碍物回避算法时，将障碍物与对象物模型化是非常重要的。在此是使用以凸多角形近似的简化模型，但是当实物为更复杂的情况时，把它分割成简单的形状，对各部分进行与上述相同方法的处理就可以了，此法扩展是很容易的。

如图5-17所示，由初始位置 S 到目标位置 G 的点的移动。如以网格表示的是障碍物，则连接 SG 的最短路径很明显是连接障碍物的顶点的直线。此性质在下面的讨论中成立。

今定义两个集合 N 、 L ， VG 是无方向性的图形。 N 是节点集合，其各元素是 S 、 G 及障碍物的各顶点。 L 是在 N 中任意两个元素连接杆中与障碍物不相干扰的数。 VG 的意义是作成这样的杆时，相互的顶点是在一平面上。 $VG(N, L)$ 是图5-17中的线段族。问题在于求连接两个节点 S 、 G 的 VG 内的最短路径问题，这样的探索用以前的方法进

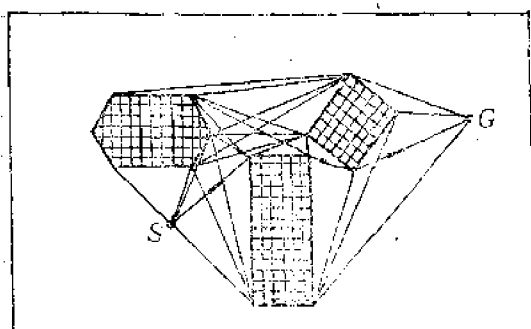


图5-17 多角形障碍物回避最短路径设计

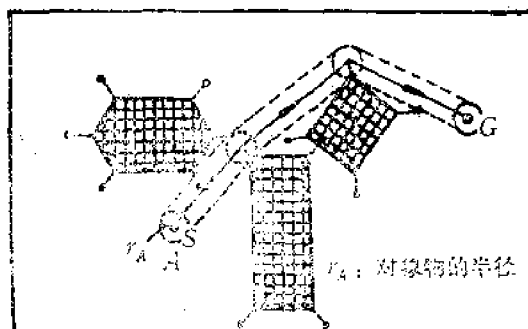


图5-18 圆形对象物的回避路径

行。Shakey的推导也是用这种方法。

图5-18是有一定尺寸大小对象物移动的例子。如图所示，若对象物为圆形时，将障碍物的各顶点扩大其半径大小，根据扩大后的顶点求出圆的中心路径就行了，这一方法在Shakey中也使用过了。

当对象物具有一般的形状时，首先在对象物上的任一位置假定参考点。然后求出对象物与障碍物产生干扰时参考点的包络图形。例如，对象物 A 的包络图形定名为 $GOS(A)$ 。这样，确定路径的问题就变成在 $GOS(A)$ 存在的区域内求参考点的路径问题了，在上述的 VG 内探索就可以了。

例如图5-19(a)是表示对象物 A 由 S 到 G 的最短路径，但是求取时，首先在障碍物

周围作出禁区 $GOS(A)$ (图5-19(b))，由连接各顶点的杆组成的 VG 就可求出最优路径。

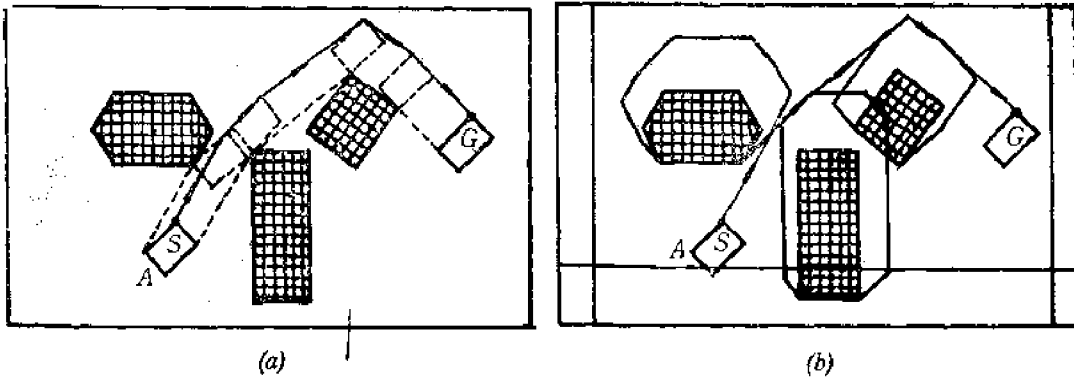


图5-19 长方形对象物的回避路径

这种方法，由于是作出禁区，所以就成为确定点的移动路径问题了。若为2维时，是求取最短路径的最好方法。值得注意的是作业区域的周围也看成一种障碍物，如不作出禁区，则对象物有可能跑到作业区域以外去。

下面考虑对象物可以旋转的情况。如图5-20所示。

即使作业区域与前面的相同，如 A 的姿势不同时，禁区也改变，因此路径也会变化。此处假定以 A 的姿势角 α 为参数作 $GOS(A_\alpha)$ 。若 A 在 S 点的姿势角为 α ，在 G 的姿势角为 β ，则在路径的中途它们有中间值时，问题就复杂了。其解法之一，是找出 A 的姿势角由 α 变到 β 的地点，在此点的前后，以 α 、 β 为一定的姿势而移动的方法。此可旋转的地点按下述办法求出。作出 A 由 α 向 β 旋转时的包络图形。为简化起见，如图5-21所示进行多角形近似 $A(\alpha, \beta)$ ，在障碍物周围若对 $A(\alpha, \beta)$ 作出禁区，则如图所示。

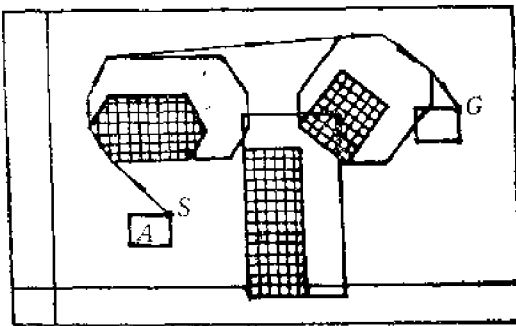


图5-20 对象物姿势不同时最短路径的变化解法的顺序如下。

(1) 由 S 出发以姿势角 α 在 $GOS(A_\alpha)$ 内找出路径。假定其终点是 $GOS(A_{\alpha, \beta})$ 内禁区中所包含的点。

(2) 以 (1) 的终点使其旋转到姿势角 β 。

(3) 在 $GOS(A_\beta)$ 内找出到达 G 点的路径。

下面具体地说明其顺序。首先把 VG 定义为 $VG_{\alpha, \beta}(N_{\alpha, \beta}, L_{\alpha, \beta})$ ，于是

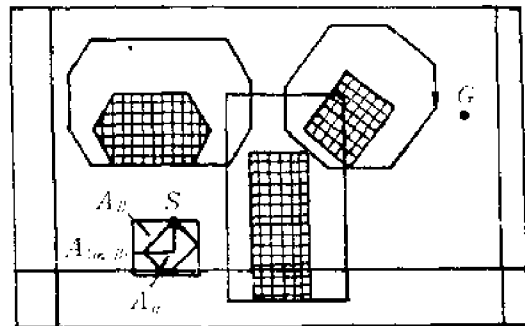


图5-21 旋转对象物的禁区

$$N_{a,b} = V_{[a,b]} \cup V_{[c,d]} \cup V_{[e,f]}$$

$$V_{[a,b]} = V_a \cup \{S\}$$

$$V_{[c,d]} = V_c \cup \{G\}$$

$$L_{a,b} = \{(n_i, n_j)\}$$

式中 $V_{[a,b]}$ 是表示对象物的姿势角范围为 $[\alpha, \beta]$ 时禁区顶点的集合; $n_i \in V_{[a,b]}$, 并且 $n_j \in V_{[c,d]}$, 而 a, b, c, d 是满足下面条件的:

- (1) 姿势角范围 $[a, b]$ 、 $[c, d]$ 是不能分离的。
- (2) n_i 是在 $GOS(A_{[a,b]})$ 内的障碍物 (禁区) 的外部。
- (3) n_j 是在 $GOS(A_{[c,d]})$ 内障碍物的外部。
- (4) 由 n_i 到 n_j 的路径是与 $GOS(A_{[a,b]})$ 与 $GOS(A_{[c,d]})$ 内的障碍物无干扰。

求得的路径是以 $S, n_1, n_2, \dots, n_k, G$, 在 $L_{a,b}$ 内以杆连接相邻节点而成的。若节点 n_i, n_{i+1} 都在 $V_{[a,b]}, V_{[c,d]}$ 的任何一个一方时, 它们就可在所属集合内的姿势角范围内进行移动, 如果 n_i, n_{i+1} 是属于不同集合时, 则必须改变 V 集合。这时, 由条件 (1), 应有满足 $\max(a, c) \leq x \leq \min(b, d)$ ($a \leq b, c \leq d$ 时) 的姿势角存在。在由节点 n_i 向 n_{i+1} 的移动中, 首先使之旋转至姿势角 x , 然后以平移运动前进到 n_{i+1} 就可以了。特别是当连接节点 n_i 与 n_{i+1} 的杆位于 $GOS(A_{[a,b]})$ 与 $GOS(A_{[c,d]})$ 两者障碍物的外部时, 改变姿势与平移运动可以同时进行。

但是, 在此方法中, 有两个很大的缺点。其一是 $VG_{a,b}$ 中的最短路径不是真正最短路径; 另一个是即使用 VG 得不到解, 这并不说明一定没有解, 其理由有下述二点。

第一是姿势的变更是在一个点进行的。比如说, 若最优路径包含有要求 α, β 中间值的狭窄通路时, 用上述计算方法就求不出解。第二是姿势的范围, 不允许超出 $[\alpha, \beta]$ 以外去。当然, 扩大 $[\alpha, \beta]$ 是容易的事, 但是变更是单方面的, 它将给第一个问题的解决带来困难, 这是其缺点。作为两者同时解决的方法, 是取代 $GOS(A_{[a,b]})$ 将 $[\alpha, \beta]$ 分割, 对每个分割后的部分作出 GOS 。但是, 这可提高对问题求解的可靠性, 同时也大幅度地增加了计算工作量, 这也是其缺点。这种方法在本节后面还要介绍。

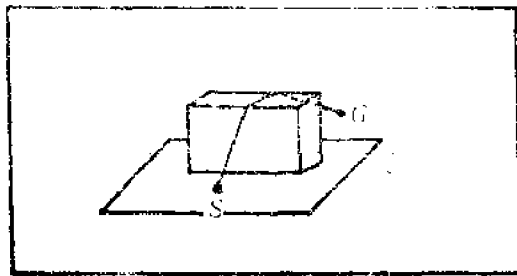


图5-22 回避3维障碍物的最短路径

上面介绍了2维问题的解法, 但如将其推广到3维障碍物的回避问题时, 还有几点是不理想的。

如图5-22所示是3维的情况, 由 S 到 G 的最短路径必须通过障碍物的顶点, 即通过棱线。因此按 VG 确定路径不能保证它是最短的。为此在棱线上要增加顶点, 将棱线分割后再组成 VG , 进行探索路径的方法。

另外, 对3维物体问题是各种处理时的计算量。对3维形状, 其禁区变得复杂了, 计算量也增大了。同时禁区顶点数也增加, 所以 VG 变得很复杂, 而路径探索所需的处理时间就增长了。但是在实际情况下, 只是在路径的一部分对象物与障碍物接近, 因为在这点附近确定路径是最重要的, 而禁区的计算也不是对所有障碍物进行的。所以只在

易于发生冲撞的特殊点或对接近于对象物的障碍物进行计算就可以了,对这些点以外的点进行粗略地近似也就足够了。但是还存在着确定注意点附近障碍物的问题。

3. 机械手作业时移动路径的自动规划

如前所述,研究用机械手进行自动装配作业时,一个重要问题是移动路径的自动规划。在MIT的人工智能实验室进行了机械手作业自动化的研究,其中培列兹进行了将回避障碍物的问题扩展到机械手作业中的实验。下面对此作简要介绍。

以机械手进行操作的基本要求如下。如以 P 表示对象物,①把机械手移到可把持 P 的位置;②把持住 P ;③将 P 移动到目标位置。这时必须给机械手以下述4个指令:机械手与对象物的几何形状;现在机械手与对象物所处的位置与姿势; P 的目标位置与姿势; P 的抓取位置等。因此当 P 的抓取位置的指令给定时,在上述条件下,就变成确定机械手与对象物 P 的非干扰最优路径问题了。对抓取位置培列兹虽然也进行了处理,但是把持对象物的问题是与人手结构有关的,所以在此只介绍路径确定问题。

在把确定回避障碍物路径的问题扩展到3维机械手作业时,培列兹提出了一个结构空间的概念,我们叫做布置空间。其定义如下:以凸多面体 R 表示作业空间,其中有 K_B 个相同的凸多面体 B_i 个障碍物存在,另外对象物 A 是由 K_A 个凸多面体 A_i 的集合构成的,即 $A = \bigcup_{i=1}^{K_A} A_i$ 。例如,机械手的各臂就相当于此 A_i 。 A 的配置取决于 A 的空间 R 内的位置、姿势的6维向量,把表示 A 配置的6维空间定义为布置空间。其次定义 $CO_A(B)$ 是以 A 的配置与 B 相贯($A \cap B \neq \emptyset$)。如按此定义,机械手作业的规划可分如下两部分。

(1) 对所有的 i, j 在 R 内求出满足 $A_i \cap B_j = \emptyset$ 的 A 配置;

(2) 求出由 A 的初始配置 S 到目标配置 g 的 R 内安全配置列。

因此在 A 的姿势固定时,变为计算 $CO_A(B_i)$,求出 R 内回避 $CO_A(B_i)$ 的路径问题。这时,计算 $CO_A(B_i)$ 是比较简单的。但是允许 A 的姿势变化时计算就变得复杂了。因为在求 $CO_A(B_i)$ 时,必须要处理高阶计算。于是引入了下面的切断的概念。

物体 $C(ER^3)$ 的 j 段是按 $\{(\beta_1, \dots, \beta_n) \in C | r_i \leq \beta_i \leq r'_i\}$ 定义的(式中 r_i, r'_i 是决定 j 元素的上限与下限)。其次对各段作除了 j 元素之外的投影,向阶数少1的空间投影。如把此投影叫做切断投影时,就可对 $CO_A(B)$ 进行低一阶的处理。图5-23是2维的例子。

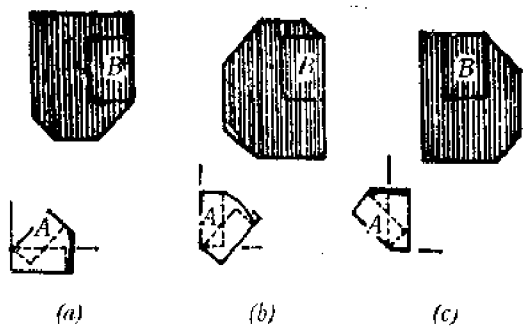
图的斜线部分是按对象物 A 的姿势角作出的三个切断部所求出的 $CO_A(B)$ 向 xy 的投影。在利用这种切断投影而求取路径时,其VG按下述方法来考虑:求取通过各切断投影的 $CO_A(B)$ 的顶点安全路径。又为了各切片间的移动,找出同时包含两切片的安全配置。即使其中任何一个移动都可作为VG臂的表现,路径规划就可用图形进行搜索了,图5-24即为此例。

作为机械手,考虑图5-25的直角坐标系。即手臂位置由 x, y, z 三个平移自由度决定,而手指部分由三个旋转自由度确定。

系统数给定的据为:

(1) 作业空间模型,障碍物的凸多面体模型。

(2) 由机械手的凸多面体构成的手臂模型(手臂的连接是旋转或平移的自由度)。



(斜线部分是表示这些投影，同时表示多角形近似，下图是A旋转时的包络图形)

图5-23 $CO_A(B)$ 的切断投影

(3) 机械手的初始位置和目标位置。

问题是确定连接初始位置的安全路径，

其顺序如下：

(1) 对障碍物求出配置空间。求出约束机械手位置的障碍物配置空间 $CO_A(B_i)$ 的切断投影。

(2) 分割 $CO_A(B_i)$ 以外的部分(自由空间)，作出凸多面体的单元。把它们作为节点，把这些节点的连接状态作为连接它们手臂的自由空间图形FSG。

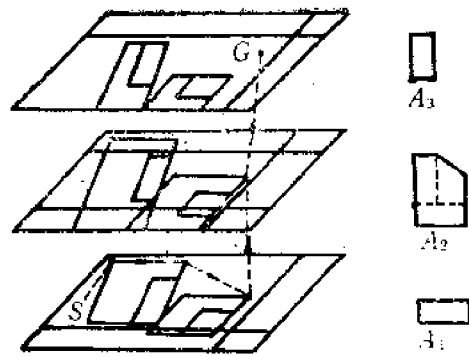
(3) 根据FSG探索安全路径。首先用自由空间单元求出安全路径，然后在各单元内确定具体的路径。

关于(1)，有确定切断投影计算的参数等问题，在此就不详细介绍，以下只对(2)，(3)加以说明。

前面在寻找路径时使用VG了，但如果对象为3维，用2维的作法是求不出来最短路径的。于是近似地作出切断投影，在 $CO_A(B_i)$ 的棱线上增加顶点寻找路径，为了得出最优性要反复地进行修正。但是这种方法，为了求出与 $CO_A(B_i)$ 连接的路径，其缺点是易受模型的正确性与近似精度的影响。与此相反，求(2)，(3)自由空间的方法是考虑VG辅助集合的方法，这样作虽然求不出最优路线，但是在处理3维问题时，求最短路径的最佳方法还没有，用这种方法还是可行的。

在将自由空间分割成单元时，从减少计算量来说，有两种分割单元的方法。其一是完整的长方体单元，其二是作任意形的凸多面体。即在离开障碍物的地方用前者，接近障碍物的地方用后者，则可提高精度。

因此整个作业空间是包含障碍物在内的混合空间，为了求出自由空间，首先分割成包括 $CO_A(B_i)$ 在内的区域和以外的长方体区域。前者又构成混合空间，后者是自由空间。把混合空间再分割下去，将空间分成自由空间、混合空间和包括障碍物的障碍物空间。反复进行这样的操作，最后分成三个空间(见图5-26)。用以上的分割构成自由空



(A_1 : A的初始位置, A_2 : A的目标位置, A_3 : $A_1 \rightarrow A_2$ 间A路径区域的多角形近似)

图5-24 用切断投影确定路径

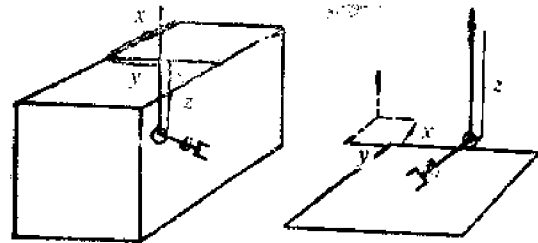
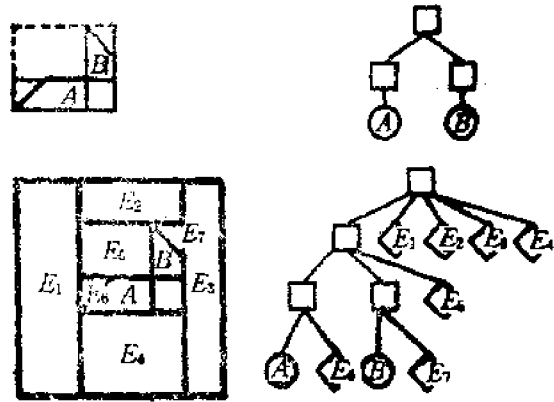


图5-25 两种直角坐标型机械手臂的结构

间图形FSG。

依上所述，求出每个机械手腕姿势角 $[C_i, C'_i]$ 的 $CO_A(B_i)$ 的切片。对于一个 $[C_i, C'_i]$ ，所有的 $CO_A(B_i)$ 的切片集合以 $COS_{[C_i, C'_i]}$ 表示。对各 $COS_{[C_i, C'_i]}$ 构成自由空间图形 FSG_i 。另外还必须加入连接 FSG_i 与 FSG_j 的节点连杆。例如，对断片 i, j 分别有自由空间单元 C_K, C_L ，若在它们中共同包含配置 C 时，是因为有连接 C_K, C_L 的连杆存在。这样，最终作为 FSG_i 的合并作成 FSG 进行路径探索。

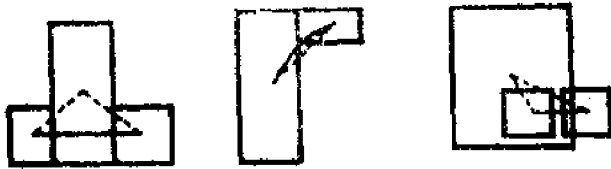


(a) 在配置空间的障碍物 (b) 空间的表示例

图5-26 2维空间的表示

(正方形：混合空间，圆：障碍物空间，菱形：自由空间)

为了确定最优路径，采用沿路径移动时间作为指标。如以确定关节角表示机械手的配置空间时，两个位置之间的移动时间可以在最大速度下使各关节角移动指定的移动量



(a) 过大估计 (b) 过小估计 (c) 过大估计

图5-27 连接单元中心路径的失败例(虚线)

(实线是通过单元接触面路径的情况)

所需时间的最大值来估计。因此，作为近似方法，把各连杆单元中心间移动所需时间作为加权而给定。这种方法，当单元是相当小的时候，其近似的精度较高，如不是这样，如图5-27所示，有时可能估计得过小或过大。

作为路径由 S 到 G 的单元列是由 FSG 求取时，下面求各单元内的路径。最简单的方法选择直线路径。但是由于连接单元中心间的直线路径不一定包含在单元内，所以采用连接单元列相邻单元间接触部分中心的路径。

如图5-28所示为上述方法的简例。

图 (a) 表示作业空间与机械手的初始位置与目标位置。 $A_1 \sim A_5$ 是机械手， A_1, A_2 是手指， A_3 是手部。 $B_1 \sim B_2$ 是障碍物， T 是工作台。图 (b) 是初始位置下的 $CO_A(B)$ 。每个凸多面体是 $CO_{A_i}(B_i)$ 。此处多为长方体，而 A_3 与 B_1, A_1, A_2 与 T 构成的 $CO_{A_i}(B_i)$ 是复杂的多面体。它们是在机械手接近障碍物时有可能产生干扰。图 (c) 是表示目标位置下的 $CO_{A_i}(B_i)$ 。图 (d) 是对中间位置的图示。图 (e) 是表示包括路径的单元列与直线路径。各单元是自由空间。如图所示，对此例而言，由于单元较大，所求的路径在离开障碍物处通过，但是当单元分割较细时，是可进一步得到改善。图 (f) 是表示把图 (e) 重叠在 $CO_{A_i}(B_i)$ 上的图形。

4. 在环境信息不足时机械手回避障碍物的控制

下面只利用局部的环境信息，研究一下机械手回避障碍物的控制方法。设机械手的

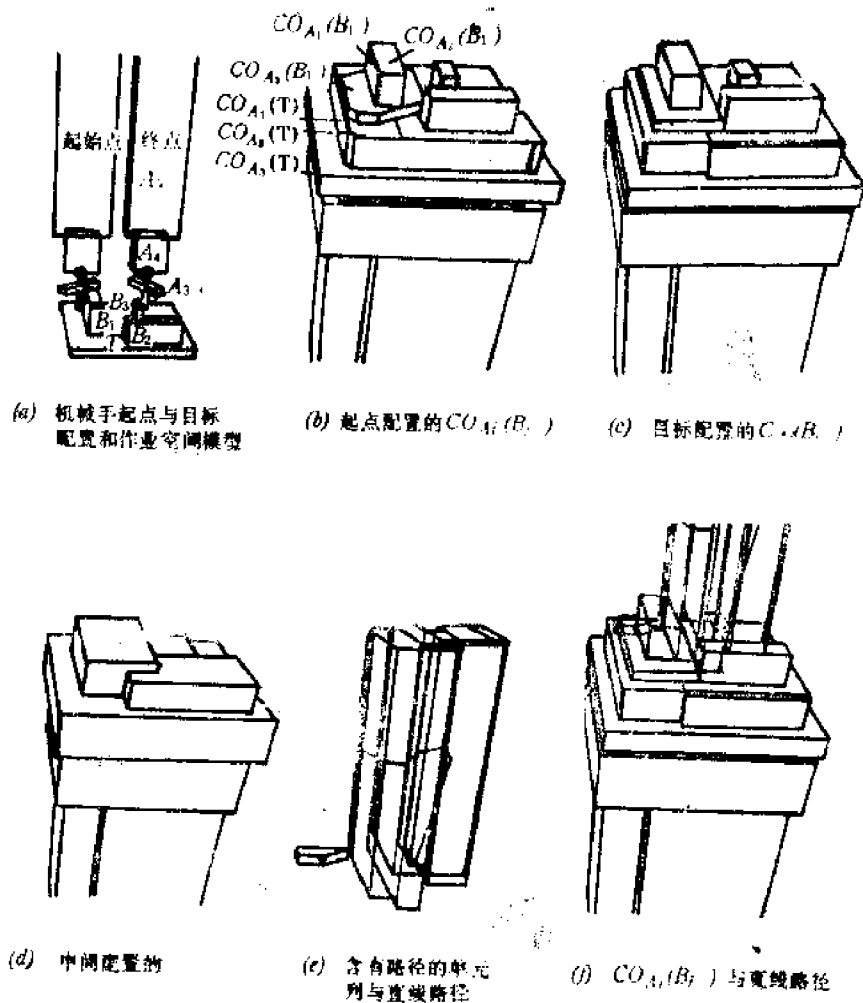


图5-28 机械手回避障碍物的模拟例

自由度为 n ，各关节的角度变量为 θ_i ，向量 θ 以 $\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)^T$ 定义。且 θ_i 满足下面的约束条件。

$$\theta_{i\min} \leq \theta_i \leq \theta_{i\max} \quad (5-17)$$

假定 r 为表示作业空间中手部状态的向量。如 θ 给定，则 r 就由 $r = F(\theta)$ 求得。

在机械手作业空间内的集合 G_s 的定义如下：

- (1) 各 θ_i 满足公式 (5-17)
- (2) 机械手的任何部分都不属于障碍物所占有的区域 P 。

不是空集合的 G_s 是存在的，并且假定是定常的，但是此 G_s 事先是不知道的。假定机械手的目标点为 r_d ，初始状态为 $\theta^* = \theta(t_0)$ 。这时，机械手的控制问题是使之产生满足下列条件的 $\theta(t)$ 。

- (1) $\|F[\theta(t)] - r_d\| < \epsilon \quad t \geq t^*$
- (2) $F[\theta(t)] \in G_s \quad \forall t \geq t_0$

(3) $\theta(t)$ 的运动由微分方程式给定。

式中 $\|\cdot\|$ 是向量的范数; ε 是表示定位精度的常数; t^* 是以 $t^* = t^*(\varepsilon, \theta^0, r_d)$ 给定的有限时间。

在 θ 空间内, 假定与作业空间内的集合 G 相对应的集合为 Γ 。在 θ 空间内只要判断机械手与障碍物是否相碰撞, 一点 θ 是否属于集合 $\Sigma = \Gamma$ 就可以了。图5-29是2自由度机械手的例子。

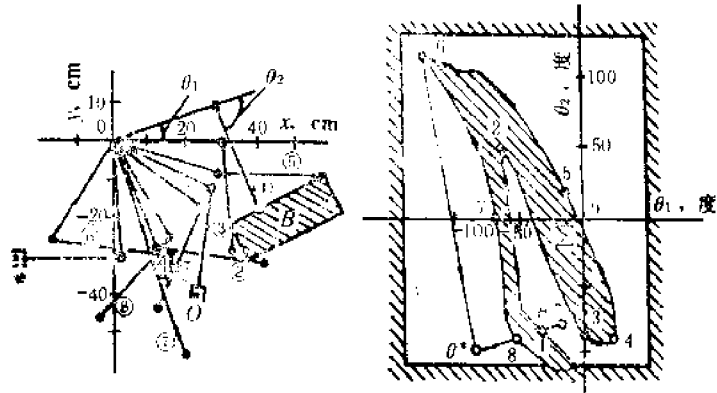


图5-29 两个自由度机械手作业空间与 θ 空间

作业空间内的 A, B 为障碍物, $0, *$ 分别为初始状态与目标值。 θ 的约束条件是

$$-140 \leq \theta_1 \leq 50^\circ, \quad -110^\circ \leq \theta_2 \leq 130^\circ$$

作为检测障碍物的传感器应尽量简单, 假定只能判断在机械手附近有无障碍物。即假定以 $\delta(\theta)$ 为传感器的输出, 对于某一值 σ , 当满足 $\|\tilde{\theta} - \theta\| < \sigma$ 的 $\tilde{\theta} \in \Sigma$ 存在时, $\delta(\theta) = 1$, 其它情况 $\delta(\theta) = 0$ 。使机械手运动的基本想法如下。在安全区域 $[\delta(\theta) = 0]$ 内, 朝着目标地点向前直进。这一动作的计算用下式表示的最大倾斜法。

$$\left. \begin{aligned} \tau_i \ddot{\theta}_i + \dot{\theta}_i &= -Q_i \\ Q_i &= \begin{cases} \omega_i = K_i \partial W(\theta) / \partial \theta_i & : |\omega_i| < V_i \\ V_i \operatorname{sgn} \omega_i & : |\omega_i| \geq V_i \end{cases} \\ W &= \|F[\theta(t)] - r_d\| \quad (1 \leq i \leq n) \end{aligned} \right\} \quad (5-18)$$

τ_i, K_i, V_i 是与驱动系统的动特性相符合的正常数。

当到达危险区域 $[\delta(\theta) = 1]$ 时, 其以后的轨迹控制是从全部障碍物不知道的情况出发, 这就归结为寻找路径的问题了。在回避 Σ 周围的时候, 要注意以下各点寻找转弯的方向:

- (1) 前进不能陷入局部的死角,
- (2) 不能在 Σ 周围永远旋转下去, 应试图朝着目标再次出发。

在考虑上述两点而到达危险区域时, 作为轨迹控制提出如下的方法。假定最初到达危险区域的点为 θ_1 , 而由 θ_1 在 $V^1 = \dot{\theta}(t_1)$ 方向上离开距离仅为 Δ 的点为 C^1 。以 C^1 为中心, 考虑以足够小的 ρ 为半径的圆 ($\|\theta - C^1\| = \rho$), 在此圆周上按一定方向前进。如果再次到达危险区域时, 用此法反复进行下去。

为了在 Σ 区域的附近进行此动作, 可通过如下改写公式 (5-18) 而实现。

$$\begin{aligned} r_i \ddot{\theta}_i + \dot{\theta}_i &= a_i S_i^K + b_i T_i^K, \quad t > t_K \\ \theta_i(t_K) &= \theta_i^K, \quad \dot{\theta}_i(t_K) = V_i^K \end{aligned} \quad (5-19)$$

$$\begin{aligned} S_i^K &= -(\theta_i - C_i^K) [(\theta_1 - C_1^K)^2 + (\theta_2 - C_2^K)^2 - \rho^2] \\ T_i^K &= -D(\theta_2 - C_2^K), \quad T_2^K = D(\theta_1 - C_1^K) \quad (i=1, 2) \end{aligned} \quad (5-20)$$

式中 $K=1, 2, \dots$, t_K 是 $\delta(\theta) = 1$ 时的时刻, a_i, b_i 是正的常数, S_i^K 是在第 K 个圆中在半径方向上的退回力, T_i^K 是沿圆周方向的前进力。 D 顺时针旋转时为 -1 , 反时针旋转时为 $+1$ 。

图5-30是表示公式(5-19)的运动例。用此方法, 即使 Σ 是非凸的, 由于是局部凸的, 也可不致于陷入死角, 能很好地回避障碍物。

其次, 是由障碍物的边界朝着目标, 确定再出发的时点问题, 对此有两种方法。第一个方法是记住最初到达危险区域的点 θ^{enc} , 沿 Σ 的边界向一定的方向旋转, 只在走上连接 θ^{enc} 与 θ^* 的直线上时才开始再出发的方法。第二个方法是在当 $V = \dot{\theta}$ 的边界线方向的速度向量 V_i 与 $-\Delta W$ 的方向一致时再出发的方法。但是当再次到达 Σ 的边界时, 前面的出发点为“开”出发点时改变旋转方向, 为“闭”出发点时不改变旋转方向。这里所说的“闭”出发点, 定义为以前通过了它附近的点。“开”出发点是以前没有通过的点。

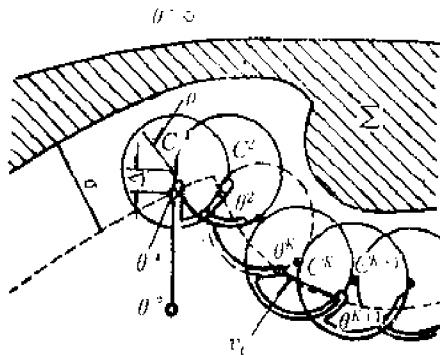


图5-30 危险区域附近的轨迹控制

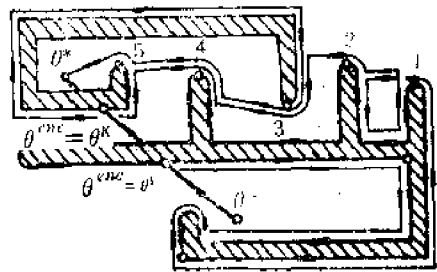


图5-31 迷路探索例

图5-31是用此两种方法沿迷路前进的例子。粗线表示前种方法的例子。

此论文说明, 作为回避障碍物机械手控制时, 即使对整个作业空间不清楚, 假定有能检测机械手附近有无障碍物的传感器时, 回避障碍物机械手也可找到路径到达目标点。作为例子, 用两个自由度的机械手, 寻找路径也是2维平面的问题, 但是它可很容易地推广到3自由度以上的机械手。

第六章 机器人的气动传动装置设计

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和循环控制的机器人，因为完成最简单操作的机器人，可靠性高且价格便宜。具有循环控制而且负载能力小于20~30kg的工业机器人，主要采用气动传动装置。它的优点是，在限位开关控制下工作时，系统结构简单，而且精度较高。使用长行程的气缸和旋转式气动马达，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传动装置就能直接控制执行机构。这种机器人的气动传动装置由执行机构(气缸或气马达)、换向阀、节流阀、减压阀、油雾器、分水滤气器、消声器及气源等组成。由于气缸(或气马达)是气动传动或伺服系统中的关键元件之一，下面要单独介绍，关于气源、节流阀、换向阀、减压阀及其它辅助设备，为了节省篇幅在此就不再讲述了。因为这些元件都已系列化了，需要时可参考有关的气动传动书和样本及相应标准而直接选用。

§ 6-1 气动装置中的气缸(或气动马达)

一 气缸的特性

由于空气的粘度比液压油的粘度低，大约为液压油粘度的1/1000，所以由管路阻力引起的压力降非常小，而且回气无须返回气源罐可直接排入大气中，所以气压传动这点优于液压传动。

其次，与液压能和电能相比，气压能可通过空气的可压缩特性加以贮存。即气缸不单是产生推力使执行机构运动，且在停止时使用它不消耗能量，而电动与液压传动使用这种方法就比较困难。一般，如使电动机做完功后保持该状态下的力时总得通过某种机械机构使它承受反作用力，而液压缸的情况是通过蓄能器以液体压力来维持这一力的存在。所以从保持作业来看，气缸带压停止就可以实现，这是气动的又一优点。

另外，气缸或液压缸的输出功率是可通过调压阀或减压阀任意调节，这点比电动较方便。还有，当负载超过电机输出功率时，由于电流增加易使电机烧坏，而气缸超负载时气缸停止不动也不会发生危险，即不必考虑过载措施，所以较安全。此外，气动对周围环境的适应能力强，对易燃易爆的特殊环境有利。

但是在气动系统中使用气缸也有一系列的难点，这些问题主要是由于空气的压缩性和高压气体的能量转换效率低而不得不使用低压等原因造成的。而压缩性对气缸动作的控制不良影响有如下几点：

- (1) 速度控制困难，
- (2) 负载变化易于引起活塞速度与停止时位置的变化，

- (3) 控制精确的停止位置较困难,
- (4) 安全性。

而由于使用压力低,使气缸尺寸大重量增加。下面分别讨论各问题点与改进措施。

1. 速度控制困难与解决办法

由于空气的压缩性,即使供气压力一定,气缸的速度也随着滑动阻力的变化而变化。一般气缸的速度控制有出口节流调速,进口节流调速与泄漏调速等3种回路方式。由于负载变化,气缸内内压的变化率越小速度越稳定。因此在速度由40~50mm/s到1m/s的范围内进行速度控制时,最好用出口节流调速回路。由于气缸高速运动时,气缸背压侧的空气必须排入大气,所以在排气口用快速排气阀将气体放入大气中的同时,速度控制最好用进口节流调速回路。

当速度为50mm/s以下时,气缸有可能产生爬行的现象。这一爬行现象也是由于负载变化而引起的,但是此负载变化并不单是作用在气缸上的重量负载,下面的各种变化也有很大影响。

(1) 气缸推动的外部滑动机构阻力的变化(金属滑动面的接触压力越高,由于润滑油膜破坏的摩擦阻力增大)。

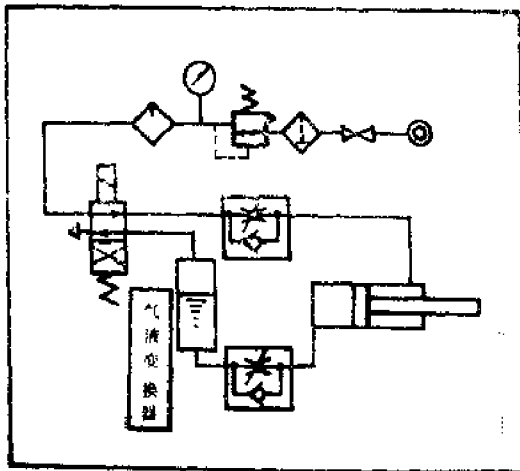


图6-1 使用气-液变换器的气动回路

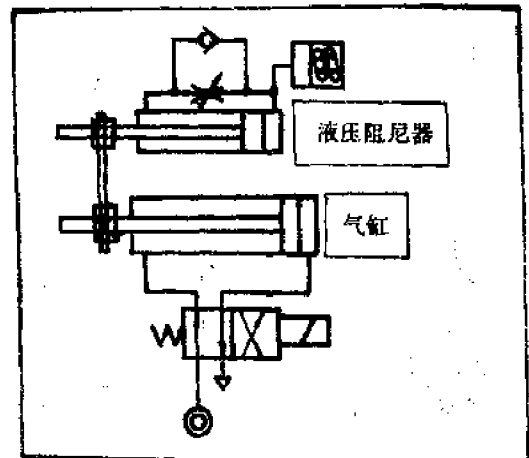


图6-2 使用液压阻尼器的气动回路

(2) 气缸上作用有横向负载,而破坏活塞杆与活塞滑动面的油膜使摩擦阻力变化。

(3) 气缸中弹性密封的阻力变化(特别是弹性密封的动摩擦与静摩擦的差别很大,对气缸运动的影响也大)。

这些原因都与空气的压缩性有关,是引起气缸运动时产生微振的主要原因。

在使用气缸时,作为防止爬行现象以及由于负载变化而引起速度变化的措施多数使用气-液变换器或液压阻尼器。这是用压缩性小的油作为中间介质以抑制气缸速

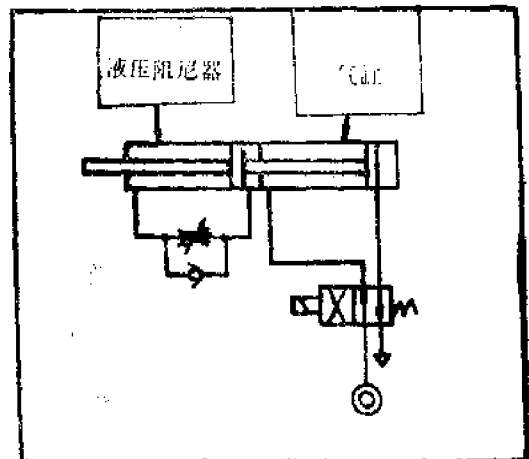


图6-3 使用液压阻尼器的气动回路

度变化的方法。图6-1是使用气-液变换器的回路，图6-2、图6-3是使用液压阻尼器的回路。

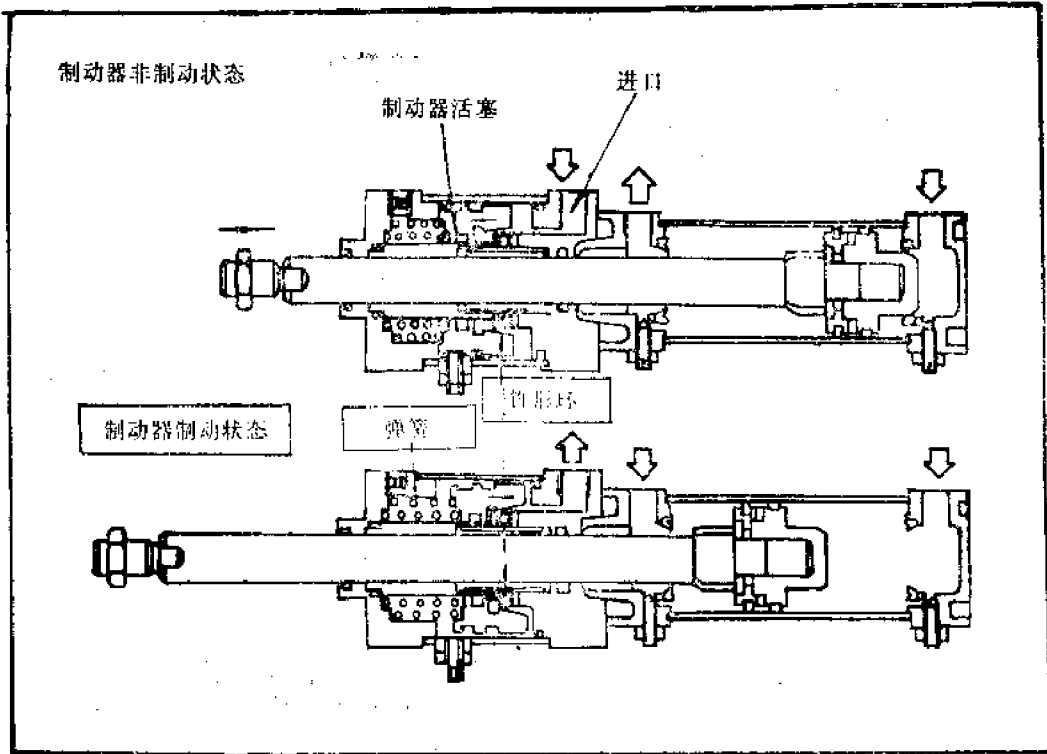


图6-4 带制动器的气缸结构图

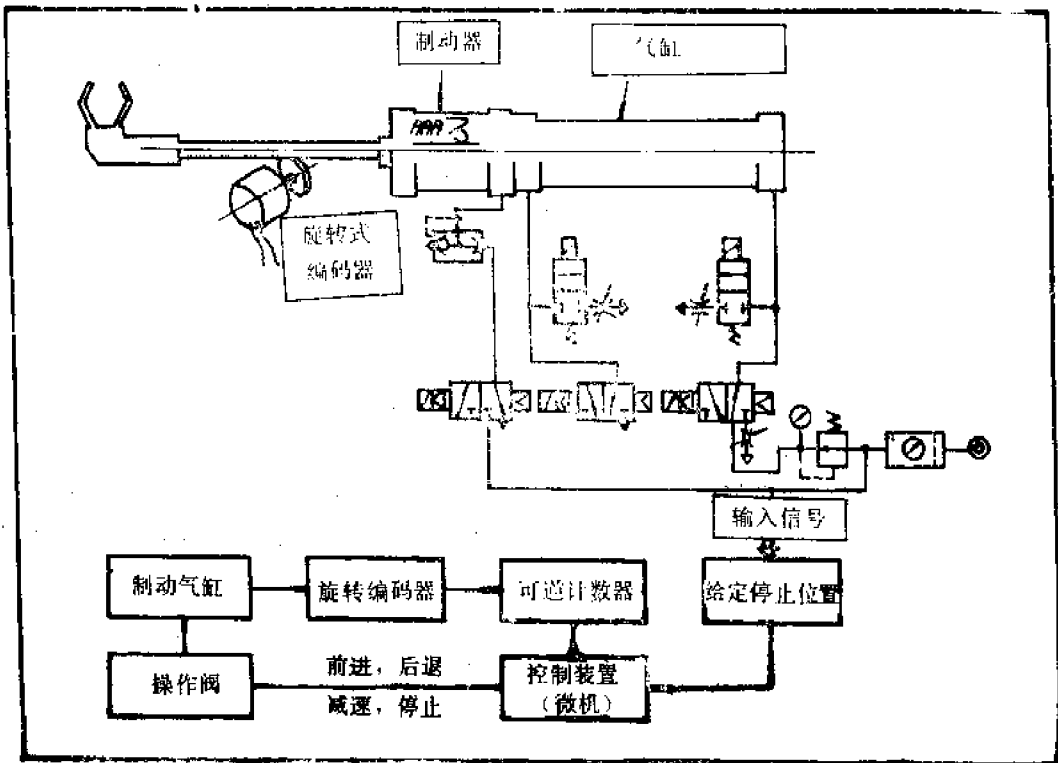


图6-5 气缸控制方框图

个限制:

- ① 需要2级以上的压缩机,其压缩效率低,每单位体积的电费不成比例地增大。
- ② 超过10大气压以上时必须按高压气体管理法处理。

由以上的原因,提高气动系统压力的作法并不现实。所以在体积受限制,要求功率大体积小,可使用气-液增压器。这时可把气缸的活塞杆当作液压柱塞使用,在液压侧的压力可增加至其断面积的比,这是用小的液压缸继续作功的方法。其结构图如图6-6所示。

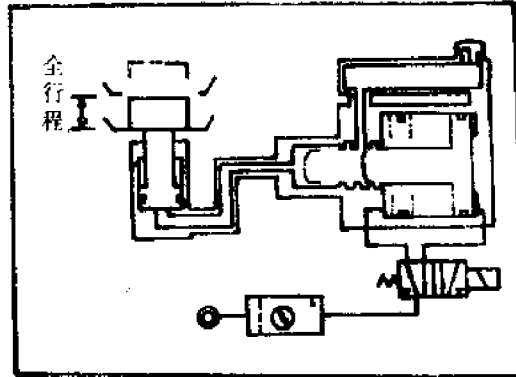


图6-6 气-液增压器的结构

这种系统的缺点是由增压器压送的油量有限,只能在此范围内作功。当需要大的力时其作功的行程短,需要力小时行程可以长。因此在重物抓取时用的较多,这时并不需要长的行程。

6. 惯性力的吸收问题

气缸的特点之一是电液执行机构相比具有较快的运动速度。但是运动速度快必须在气缸的行程末端吸收其动能,这是一个很重要的问题。

一般的气缸与负载重量有关,但是以缓冲器吸收1m/s运动的负载是非常困难的,这时必须加长缓冲行程或装设外部缓冲器以吸收此惯性能量。外部缓冲器如图6-7所示。

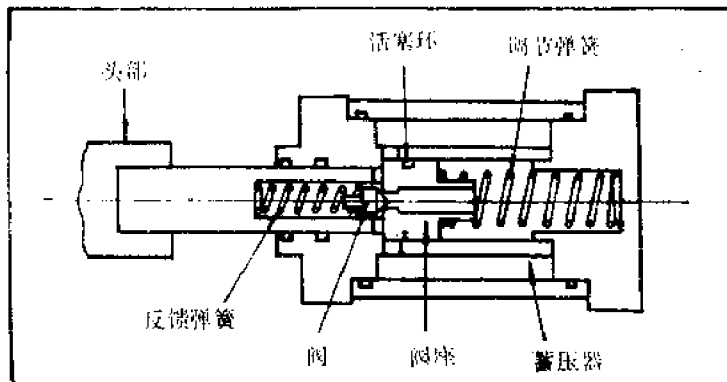


图6-7 外部缓冲器的内部结构图

二 气缸特性的简易算法

一般从不同的需要角度对气缸有不同的要求,例如从动作特性来看就有以下各种要求:

- (1) 保证输出功率就可以;
- (2) 动作时间必须在规定时间以内;
- (3) 缓冲的作用良好,不产生冲击;
- (4) 运动速度不应有大的变化;
- (5) 要求中位停止的重复精度;

- (6) 可高速且平滑地进行高、低速换向；
- (7) 位置控制时超调不能过大。

对这样的要求有时用气动驱动是较困难的，但是气动特点是易于调节并且造价低，所以实际设计时用气动传动在很多情况下是很经济的。但在什么情况下可以使用气缸并没有合适的判别方法，有时是靠实验与经验来确定。因此，在这里为了简化这样的复杂判别方法，介绍一种简单判别复动气缸是否合用的方法，关于实际气动系统设计时的详细计算可参阅有关气压传动的书籍。

1. 气缸的作用力

如图6-8所示的气缸，其力平衡式如下：

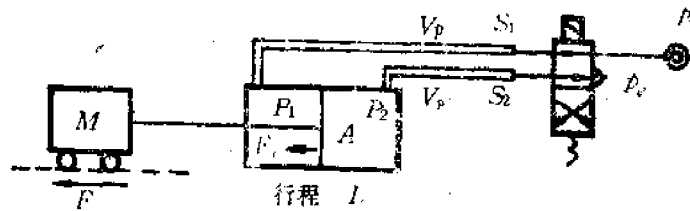


图6-8 气动系统图

$$p_1 A - p_2 A - F_i - F - M A_c = 0 \quad (6-1)$$

式中 p_1 是供气侧压力 (P_1 绝对压力)； p_2 是排气侧压力 (P_2 绝对压力)； A 是活塞面积 (m^2)； F_i 是内部摩擦力 (N)； F 是外部阻力 (N)； M 是负载质量 (kg)， A_c 是负载加速度 (m/s^2)。

2. 稳态输出力

气缸静止不动时的输出力 F_s 是以 p_1 等于气源压力、 p_2 等于大气压力、惯性力等于零代入式 (6-1) 时与 F 相等而求得的。

$$F_s = p_0 A - p_a A - F_i \quad (6-2)$$

式中 F_s 为静止输出力 (N)， p_0 为气源压力 (P_0 绝对压力)， p_a 为大气压 (P_a 绝对压力)。

这时的 F_s 值，在一般的使用压力范围 (300~800kPa) 时为 F_s 的 5~20% 左右，但是其值是与气缸尺寸大小、密封种类及压力等有关的。在 F_s 的具体情况不清楚时可按 A (50kPa) 来估算摩擦力 F_i 。

3. 动态输出力

气缸在运动时的有效输出力比上述的 F_s 要小，但是一般并不是直接求取此动态输出力，而是采用计算外部阻力 F 为稳态输出力 F_s 的 60% 以下时的动作时间。而在 60% 以上时，由于对摩擦的估计误差或由于给排气特性的变化而使计算精度下降的影响变大，所以用简单的方法不能准确地计算动作时间，这时就要按气体的有关定律来进行分析计算了。

4. 表示气缸动特性的常数

为了知道气缸的特性，求出下列各常数值后就易于理解了。

- (1) 时间常数 $T_c(s)$

$$T_c = 0.00521 A \cdot L / S_2 \quad (6-3)$$

L : 行程 (m),

S_2 : 排气口的有效断面积 (m^2)。

在此省去对时间常数的详细介绍,它是与容积等于气缸容积的气罐的充气时间相近的数值。

(2) 平衡速度 U_c (m/s)

$$U_c = 192 S_2 / A \quad (6-4)$$

此速度是气缸的动作速度达到平衡时的稳态速度值。

(3) 空气流加速度 A_n (m/s^2)

$$A_n = U_c / T_c$$

此加速度是无负载气缸的假定平均加速度。

(4) 静加速度 A_s (m/s^2)

$$A_s = p_0 A / M$$

此加速度为无背压时的最大加速度。

(5) 惯性系数 J

$$J = A_s / A_n = p_0 A T_c / (U_c M) \quad (6-5)$$

此无因次系数表示气缸的动作主要由气流决定还是由负载惯性来决定。所以粗略地说,当 $J > 1$ 时气流的影响大, $J < 1$ 时惯性的影响大。但是在 $10 > J > 0.2$ 的范围内,两者的影响是混杂在一起的,所以气缸的动作就更复杂了。

在讨论气缸的动态时,此 J 的数值是很重要的。比如说,在与空气流量成比例调节控制气缸的速度时至少应取 $J > 10$ 。否则由于惯性使迟后变大,这时是得不到满意的响应特性的。

(6) 负载率 G

$$G = (F + F_f) / (p_0 A) \quad (6-6)$$

此数值是影响气缸克服负载开始运动的时间及加速大小的数值。

(7) 无效容积率 C_v

$$C_v = V_p / (A L) \quad (6-7)$$

V_p : 是管路、气缸头内活塞不能到达的死空间 (m^3)。

此数值是影响气缸开始运动以前的排气时间和开始运动之后的速度稳定度的数值。

(8) 节流比 R_s

$$R_s = S_1 / S_2 \quad (6-8)$$

S_1 : 流入口的有效断面 (m^2)。

R_s 是与 C_v 有同样影响的数值。

当求出以上有关气缸的动作特性的数值后,就可用下面的近似公式计算气缸的动作时间和计算缓冲能所需的最终速度。

(1) 气缸的动作时间 T (s) 近似计算公式为

$$T = T_c (X^{1.25} + Y^{-0.025})^{0.8} \quad (6-9)$$

$$\text{式中 } X = 1 + (1 + 1.5C_v) \cdot \log\left(\frac{1 + 0.2R^2}{1 - G}\right) \quad (6-10)$$

$$Y = 0.45 J^{1.1} \cdot \left(\frac{1 - G - p_r}{p_0}\right) \quad (6-11)$$

此近似式在下述参数范围内其最大误差为10%左右。

- ① $J > 0.1$
- ② $0.6 < G < 0$
- ③ $1 > C_v > 0$
- ④ $R_r > 0.5$

(2) 气缸的最终速度 U (m/s)

$$U = U_c [1 + \{2J(1 - G)\}^{-2}]^{-0.25} \quad (6-12)$$

此最终速度 U 的近似计算式的参数范围如下。

① $C_v < 0.3$ ，并且是用有效断面积比管路换向阀系统有效断面小的速度控制阀装在气缸附近实行出口节流控制的情况（见图6-9）。

② 其它范围与动作时间相同，但是如图6-10所示，当 $0.3 < G < 0, 10 > J > 0.5$ 的范围内，运动速度最大时正好到达行程的终点，所以实际的最终速度比这个近似值最大30%左右。

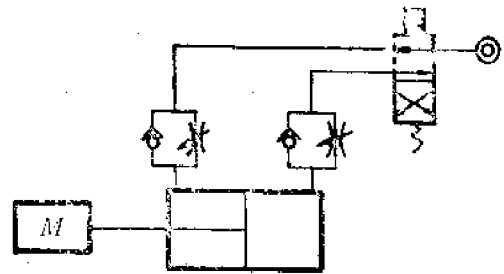


图6-9 出口节流控制系统图

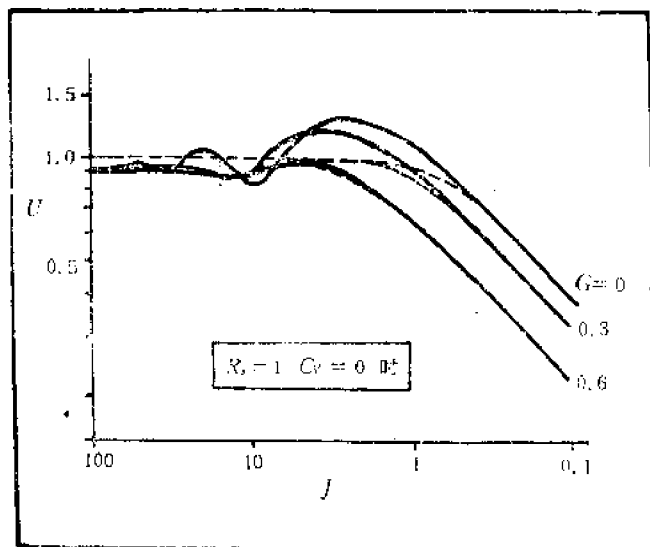


图6-10 最终速度变化曲线

(3) 平衡状态的气缸内压

在 $J > 2$ 的范围内气缸在大部分行程上是以与平衡速度 U 接近的状态运动。因此，在此范围内气缸的内压也基本上是不变的。

$$p_1 = p_0(1 + 0.25R_v) \quad (6-13)$$

$$p_2 = p_1 - p_0G \quad (6-14)$$

p_1 : 平衡时供气侧压力 (Pa绝对压力),

p_2 : 平衡时排气侧压力 (Pa绝对压力)。

当 $p_2 < 150\text{kPa}$ 时, 则得不到实用的近似精度, 其它的适用范围与动作时间的相同。此 p_2 是与气缸中的缓冲装置所吸收的功成比例。又当 $L < 0.5$ 时, p_2 与大气压 p_0 值相近。

(4) 平衡状态的固有振动周期 $T_f(s)$

如果知道运动中的气缸内压, 则可近似地求出固有振动周期。

$$T_f = \pi T_c \sqrt{\frac{1 + C_v}{zJ}} \quad (6-15)$$

式中 $z = (p_1 + p_2)/(2p_0)$ 。如图6-9所示, 是在气缸出口进行节流调节时, C_v 可以用 $1/2$ 代入。实际的 T_f 值是随着振幅与活塞位置的不同多少有些变化, 此计算值是求得的最长侧周期。例如使气缸跳跃动作时, 即使是比此周期的 $1/2$ 小的短时间间隔进行流量调节也得不到明显的响应, 让它在中间位置停止时的振动衰减时间需要此数值的几倍。

以上介绍的方法虽然是近似的, 但是如若按这种方法对气缸组成的系统动作状态进行验算可使实际工作时的事故大为减少。

三 工业机器人气动装置中的气缸制动

一般带循环控制装置的气动机器人定位点数目是有限制的, 而限位开关又是保证定位精度的。用机械装置做为限位开关时, 其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。

若使用吸合时间 $t = 0.1 \sim 0.2\text{s}$ 的气动换向阀, 气缸两个停车点之间最短行程为 100mm 。这时气缸对应的速度约为 1m/s 。所以工业机器人执行机构在这种速度下, 一个自由度的停止点数目最多是 $6 \sim 9$ 个(视行程大小而定)。假如利用由几个行程不同的气缸串联而成的位置控制那么就可以增加定位点数目。例如由 3 个气缸组成的位置控制, 就可有 $2^3 = 8$ 个定位点。当在工业机器人中采用位置控制时应当注意到, 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, 世界各国都在研究具有点位控制的气动机器人。图6-11是一个自由度的点位控制机器人气动传动装置原理图。

在定位点范围内, 根据反馈传感器 3 的信号, 利用反压实现传动的制动。制动时执行机构速度下降。最小稳定速度即爬行速度, 是最大工作速度的 $5 \sim 10\%$ 。用制动装置 2 直接使气缸保持在定位点上。西德的PAT公司研制的具有点位控制的气动传动装

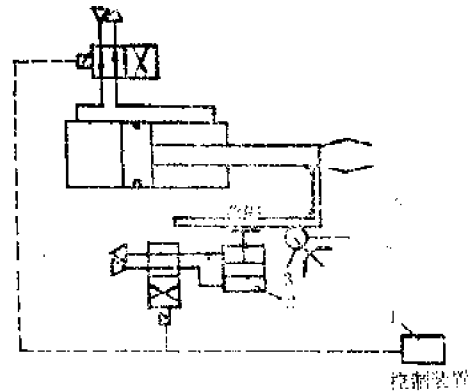


图6-11 单自由度点位控制气动传动原理图

置，用圆盘式电磁制动器保证速度降低到爬行速度。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可知，气动比液压的几乎便宜两倍。

不论是循环式的还是点位式的控制装置，机器人的气动系统均包括有气动执行器、方向阀、节流阀和能源。

设计气动机器人的原始数据是气缸（或气马达）的运动时间（或 $V/m/s$ ）、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与大气相通的管路上的装置的过流断面。

在气动执行元件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50mm的气缸，若取某一保险系数，摩擦力可取为0.25PA。此处 P 为气源压力， A 是活塞面积。假如机器人传动装置的活塞和活塞杆重量不超过 10~20kg，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 A 值。任意取一个 A 值，使它大于计算的 A 值中的最小值。用选择气动执行元件输入、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。动态计算可使得每个自由度选择出的参数更加精确合理。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。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负载压力 $p_L = F_L/A$ 为止，其中 F_L 是外部总负载力。活塞开始移动，活塞运动方程式为

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = p_1 A_1 - p_2 A_2 - p_s A_s - F_L \quad (6-16)$$

式中 p_1 、 p_2 分别为工作腔与排气腔的压力， A_1 、 A_2 、 A_s 分别为气缸无杆腔、有杆腔及活塞杆的面积， m 为可动部分质量， x 为活塞杆的位移。

工作腔和排气腔压力变化方程式分别为

$$\frac{d\sigma_1}{dt} = \frac{k\sigma_1}{x_0 + x} \left(\frac{G_1 RT_{10}}{\sigma_1 p_{10} A_1} - \frac{dx}{dt} \right) \quad (6-17)$$

$$\frac{d\sigma_2}{dt} = \frac{k\sigma_2}{x_0 + s - x} \left(-\frac{G_2 RT_{20}}{\sigma_2 p_{20} A_2} + \frac{dx}{dt} \right) \quad (6-18)$$

式中 σ_1 、 σ_2 是压力比值， $\sigma_1 = p_1/p_0$ ， $\sigma_2 = p_2/p_0$ ， p_0 是管路的气体压力； k 、 R 分别是绝热指数和气体常数； T_{10} 、 T_{20} 、 p_{10} 、 p_{20} 分别是气缸的无杆腔与有杆腔内的温度与压力； G_1 、 G_2 分别是进入气缸的空气流量； x_0 、 x 与 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。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对气动执行机构的制动。

用气动节流方法制动是指当机器人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关闭瞬间腔内压力大小有关。因为有很多不能精确考虑的因素，如阀门及密封元件的漏气，负载振动引起流量特性变化等，所以不能确定制动行程 x_1 的精确值。使用动态法可以估算出，以允许的加速度值，在给定的结构参数下，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根据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节复杂；由空气可压缩性引起的制动过程太长；可能产生振动等。综上所述，对于负载力为中等（5~10kg）和负载力较大（大于10kg）的气动机器人，这种制动方法是不可取的。

用阻尼装置制动的基本原理是，采用阻尼器吸收传动装置的运动能量。

当气动传动装置的惯性负载小时（即负载力小于1kg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，并便于调节阻尼器。弹簧阻尼器结构比较简单。但是即使只要求得到好的制动特性，即弹簧特性按要求的加速度选择，弹簧尺寸也是相当大的。因此，在中等和大的负载力时，不能采用弹簧阻尼器。最常用的是液压阻尼器。

应当指出，有一些气动工业机器人是采用液压制动装置的。在制动瞬间，与气动缸活塞杆相连的顶杆碰上液压阻尼器的开关，并把它压下，气缸就停止了。图6-12是液压阻尼器的工作原理图。

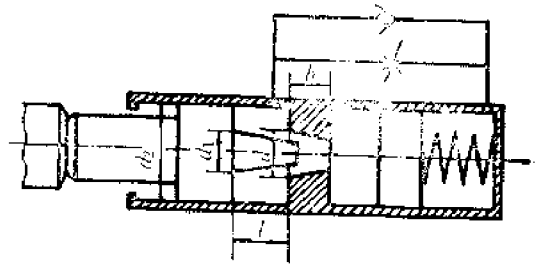


图6-12 液压阻尼器

气缸制动时，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

$$\sigma_1 - \frac{p_e}{p_0} \frac{A_2}{A_1} \frac{1}{\sigma_2} - \sigma_p - \frac{F_d}{p_0 A_1} = \frac{m}{p_0 A_1} \frac{d^2 x}{dt^2}$$

式中 $\sigma_p = (F_{T_0} + p_e A_e) / p_0 A_1$ ， $F_d = p_f A_f$ 是阻尼器作用在活塞杆上的力。

假如求得在制动时刻的压力 p_f ，就可以求出 F_d 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

$$Q = Q_d \frac{dx}{dt} = \pi d p_f \frac{\delta^3}{12 \mu b}$$

就能求出压力 p_f 。则力 F_d 等于

$$F_d = p_f A_f = A_f^2 \frac{12 \mu b}{8^3 \pi d} \frac{dx}{dt}$$

式中 d 是阻尼器针阀下面的孔径。

压力 p_f 的作用面积由下式求得

$$A_f = \frac{\pi(d_2^2 - d_1^2)}{4}$$

式中 d_1 、 d_2 分别为阻尼器的活塞和活塞杆的直径； b 、 δ 分别是阻尼器阻尼缝隙的宽度和大小。考虑到 F_d 值，可得平衡方程式为

$$\sigma_1 - \frac{p_0 A_2}{p_0 A_1} \cdot \frac{1}{\sigma_2} - \sigma_p - k_d \frac{dx}{dt} = \frac{m}{p_0 A_1} \cdot \frac{d^2 x}{dt^2} \quad (6-19)$$

式中

$$k_d = \frac{A_1^2 12 \mu b}{p_0 A_1 \pi d \delta^3}$$

类似于方程式 (6-17) 和 (6-18)，可以写出工作腔和排气腔的相对压力变化方程式。若已知气动执行机构的稳态运动时的初始值 $\sigma_{1\infty}$ 和 $\sigma_{2\infty}$ ，制动开始的坐标 x_0 ，并给出允许加速度 $d^2 x/dt^2$ ，则方程 (6-17)、(6-18) 和 (6-19) 可用数字方法求解。根据解的结果，就可确定保证所要求制动状态的方程 $k_d = f(x_T, t)$ 。若在制动的行程范围内 k_d 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_1 和 d_2 ，就可确定缝隙 δ 与 x_T 的函数关系。图6-13给出了负载力为15kG，稳定速度为0.5m/s，允许的加速度为 $d^2 x/dt^2 = 1.25g$ 的机器人水平臂的气动传动的 $\delta(x_T)$ 关系曲线。不同阻尼器尺寸对应不

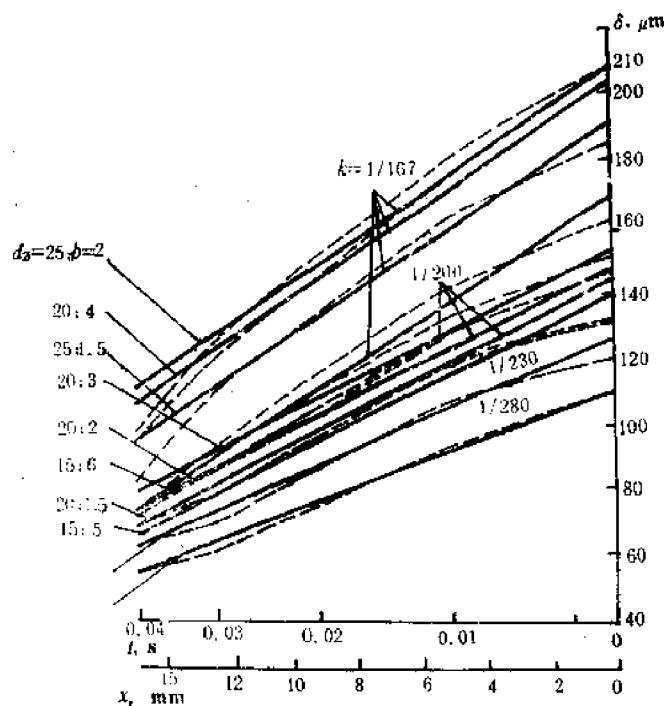


图6-13 $\delta(x_T)$ 关系曲线

同的 $\delta(x_T)$ 曲线。例如，当 $d_2 = 20\text{mm}$ ， $b = 4\text{mm}$ 时，开始制动时缝隙 $\delta = 0.208\text{mm}$ ，经过制动路程 $x_T = 15\text{mm}$ 后，缝隙 $\delta = 0.095\text{mm}$ 。运动圆锥的锥度为 $K = 0.006$ 。

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。

下面讨论用反压（即反向压力）分析气动传动的制动力特性。假定执行机构的制动

是由关闭工作腔进气口而使排气腔进气时，则其力的平衡方程式可写成如下形式

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = \left(\frac{\sigma_1}{p_{20}} - \frac{\sigma_2}{p_{10} \lambda_A} - \frac{\sigma_F}{p_{20}} \right) p_{10} p_{20} A_1 \quad (6-20)$$

式中 p_{10} 是稳态时气缸（或气马达）工作腔压力， $\lambda_A = A_2/A_1$ 。

制动时工作腔的容积为

$$V_T = V_{10} + A_1 x_0 + A_1 x \quad (6-21)$$

式中 V_{10} 是原始的固定容积，只与气缸结构有关， x_{10} 是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，则

$$p_1 = p_{10} \left(\frac{V_{10} + A_1 x_0}{V_T} \right)^k$$

或者写成比值形式为

$$\sigma_1 = \left(\frac{V_{10} + A_1 x_0}{V_T} \right)^k$$

制动腔内压力变化的方程可写成如下形式

$$\frac{d\sigma_2}{dt} = \frac{k\sigma_2}{s-x} \left(\frac{G_2 RT_2}{p_{20} A_2 \sigma_2} + \frac{dx}{dt} \right) \quad (6-22)$$

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式为：

$$\sigma_2 = \frac{V_2}{V_{20} - A_2 x}$$

式中 V_2 为 $\sigma_2 = 1$ 时制动腔的容积， V_{20} 是制动腔与连接管道的总容积。

将公式(6-16)~(6-22)联立可用数字求解。从而可求出函数 $p_1(t)$ 、 $p_2(t)$ 、 $x(t)$ 与 $x_1(t)$ 以及制动时的最大加速度值。

若反压制动，令进气口仍然进气，排气口也进气时，就要联立求解作用力动态平衡方程式及气缸的工作腔和有杆腔内压力相对变化的方程。这两个方程式是

$$\frac{d\sigma_1}{dt} = \frac{k\sigma_1}{x_0 + x} \left(\frac{G_1 RT_{10}}{\sigma_1 p_{10} A_1} - \frac{dx}{dt} \right)$$

$$\frac{d\sigma_2}{dt} = \frac{k\sigma_2}{x_0 + s - x} \left(\frac{G_2 RT_{20}}{\sigma_2 p_{20} A_2} + \frac{dx}{dt} \right)$$

下面分析，在反压制动下，控制作用和机器人结构参数对传动的动力特性的影响。图6-14给出了作为机器人一个运动自由度的气动传动方案。

由供气管路进来的气体经过换向阀 3，减压阀 4，单向阀 5 进入气缸 6。经过节流阀 7，换向阀 3，单向阀 8，换向阀 1 进行排气。当进气口关闭，出气口进气进行制动时，换向阀 3 要换向。由供气管路送来的空气经过单向阀进入气缸 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。使换向阀 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。现对最常见的机器人(负载力为5~10kg)传动装置的动力特性进行分析。其结构参数是:

$A_1 = 18.8\text{cm}^2$, $A_2 = 11.2\text{cm}^2$,
 $A_3 = 8.6\text{cm}^2$, $s = 600\text{mm}$, $m = 10\text{kg}$,
 $V_0 = 1\text{m/s}$, p_s (气源压力) = 0.5MPa ,
 $F_L = 200\text{N}$ 。工作通道和制动通道的局部阻力综合系数分别为 $\sigma_1 = 80$, $\sigma_2 = 50$ 。气缸定位点的坐标是 $x_1 = 100\text{mm}$, $x_2 = 300\text{mm}$, $x_3 = 500\text{mm}$ 。

现在分析,工作腔关闭排气腔进气、工作腔进气排气腔也进气时两种制动状态的动力特性。解联立方程组,并把解得结果化为相对形式,就可求出图6-15所示的 $\Delta\xi = f(\xi)$ 关系。其中 $\Delta\xi = \Delta x_i / \Delta x_{\min}$ 是制动路程比值, $\xi = x_i / x_{\max}$ 是用比值表示的瞬时行程坐标值, Δx_i , Δx_{\max} 是制动初始点瞬时坐标值和最大值。

图6-15的曲线1表示工作腔进气排气腔也进气的制动行程与开始制动点坐标之间的关系,曲线2是工作腔关闭排气腔进气的制动状况。

由 $\Delta\xi = f(\xi)$ 图可以看出,用工作腔关闭排气腔进气比两腔都进气的制动路程更稳定。用后者,空气进入制动腔时也不断进入工作腔(无杆腔)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)大则制动行程长。 $x_1 = 100\text{mm}$ 时制动行程最大。

图6-16表示工作腔关闭排气腔进气时结构参数对制动行程的影响,制动行程比 $\Delta x_{\max} / \Delta x_{\min}$, Δx_{\max} 是 $x_1 = 100\text{mm}$ 时的行程, x_1 是气缸某些结构参数变化的函数, Δx_{\min} 是 $x_3 = 500\text{mm}$ 处制动时的行程,结构参数不变。在所研究的 x_1 、 x_2 、 x_3 点上,在 x_3 点处制动时行程最小。

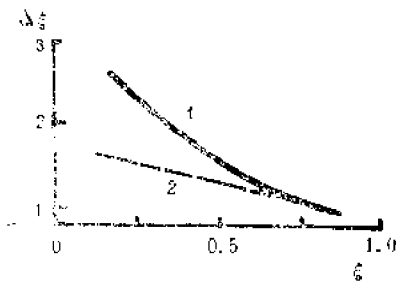


图6-15 $\Delta\xi = f(\xi)$ 曲线

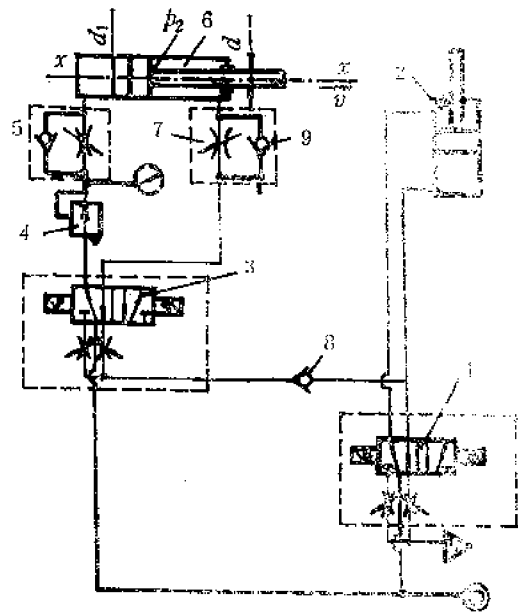


图6-14 机器人气动回路图

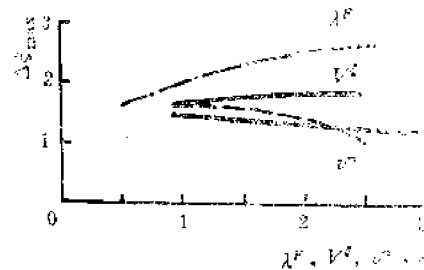


图6-16 结构参数对行程的影响

从图6-16曲线上得出的制动行程相对最大不稳定度数值 $\Delta\xi_{\max}$ 与各个给定的结构参数值相对应。制动行程不稳定度与气缸有杆腔的活塞面积和工作腔的活塞面积(都以面积比表示)之间的关系可用函数 $\Delta\xi_{\max} = f(\lambda^P)$ 表示。制动压力的变化正比于 A_1 的变

化（或者说反比于 A_2 ）。

可用 $\Delta \xi = f(v^{\xi})$ 的关系确定制动通道中气体流动阻力对制动行程的影响，其中 $v^{\xi} = \xi_{T_i} / \xi_{T_{\min}}$ （最小阻力系数 $\xi_{T_{\min}} = 55$ ），在给定的 ξ_T 值范围内 v^{ξ} 值不大。从图6-16曲线上可以看出，制动行程随参数 v 增加而加大。根据图6-16所给的 $\Delta \xi = f(v^{\xi})$ 关系曲线（其中 $v^m = m_i / m_{\text{总}}$ ）可知，气缸可动质量增加，使制动行程值在很大范围上稳定不变。由 $\Delta \xi_{\max} = f(x)$ 关系曲线（ $x = F_L / F_{L_{\min}}$ ）可知，增加运动阻力 F_L 对制动行程有相似的影响。

由上述的分析可知，当采用反压制动时，控制方式、制动初始点坐标值、气缸的活塞杆腔工作面积与无杆腔的工作面积的比值对气动传动中制动行程的不稳定度有决定性影响，而制动通道中气流阻力、运动阻力及质量变化则影响较小。

随着可动质量和运动阻力的增加，气缸制动的行程大小就更稳定了。对于有大的负载力（大于10kg）的气动机器人来说，气缸采用反压制动法是有发展前途的。

采用上述方法，苏联有人对日本“阿依达”工业机器人水平移动机械手的气动传动装置进行了实验研究。研究所采用的参数是：附加质量为5~10kg，制动开始的坐标： $x_1 = 215\text{mm}$ ， $x_2 = 315\text{mm}$ ， $x_3 = 515\text{mm}$ ，气源压力 $p_s = 0.4\text{MPa}$ ，运动阻力测量值230N。经过实验研究表明，制动行程的平均值是：当 $x_1 = 215\text{mm}$ 时， $\Delta x_{1T} = 147\text{mm}$ ；当 $x_2 = 315\text{mm}$ 时， $\Delta x_{2T} = 142\text{mm}$ ；或者当 $x_3 = 515\text{mm}$ 时， $\Delta x_{3T} = 140\text{mm}$ 。制动行程最大不稳定度，以相对值单位表示为 $\Delta \xi_{\max} = 1.05$ 。一般机器人采用反压方法制动，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，因为这时不需要采用阻尼机构。这样就提高了机器人的可靠性。它的主要缺点是在反压制动时，气动缸的工作腔和制动腔的初始压力比值调节比较复杂。

§ 6-2 机器人的气动控制系统

在机床、铸造、锻压机械的装卸作业和焊接、喷涂、安装等作业中使用大量的工业机器人，仅日本就有10万台以上在工作。在这些机器人中，固定程序或可変程序式气压驱动的工业机器人是简单的开闭式位置控制，其中多数是进行装卸作业的。

气动的工作介质是空气，由于空气的压缩性，所以高速运动工业机器人执行机构的控制精度是一个困难的技术问题。但是由于开发了制动气缸、高性能的比例电磁阀和气动伺服，这些位置控制也得到了改善，这些技术正在工业机器人的控制系统中应用着。

一 气动机器人的位置控制系统

气动执行机构与液压、电动相比，单位重量的输出大，动作速度快，且维护及操作简单；但是响应性较慢、位置控制性能差，这是它的缺点，总的来看还没有跳出简易工业机器人的范围。但是从目前来看，它正在为使气动的特长得到发挥，为制造可实现复杂动作机器人而努力。下面介绍气动工业机器人的位置控制。

1. 挡铁式位置控制系统

气动执行机构的位置控制多数是挡铁式开闭控制。以减震器使气动执行机构的行程末端减速后停止。减震器有空气阻尼式与液压多孔节流式。有必要以挡铁进行多位置停止时，则采用机械式挡铁。这是在手臂希望的位置上设有多级调节挡铁，在调节挡铁位置上使另设的减震器停止装置换向，可使在中间的多数位置停止。挡铁方式的特点是位置精度非常高（可达 $\pm 0.01\text{mm}$ ），适用于对位置精度有要求的作业。日本昭空制的工业机器人就是采用机械挡铁方式，用于热冲压的工件装卸作业。

2. 制动器方式位置控制系统

即使气缸活塞两腔的压力是平衡的，由于外力作用也容易移动。所以为了在中位停止和对外力锁紧，开发了带制动器的气缸。

制动器方式有在气动执行机构中装设制动器和装设电磁制动器两种型式。而位置控制方式又分为以行程开关等检测位置之后加制动器使之停止的开闭式控制和以编码器或电位计检测位置之后，根据给定位置或从其位置之前的反馈信号对气动执行机构加以制动而进行位置反馈的控制。

图6-17是使用日本太阳铁工制动气缸的工业机器人手臂的控制系统。其工作原理是，以直线运动电位计检测手臂的位置后变成模拟电压，通过A/D变换器反馈给微机。微机是求出给定位置与检测位置的差值，并按差值的大小按非线性函数发生程序决定控制量。

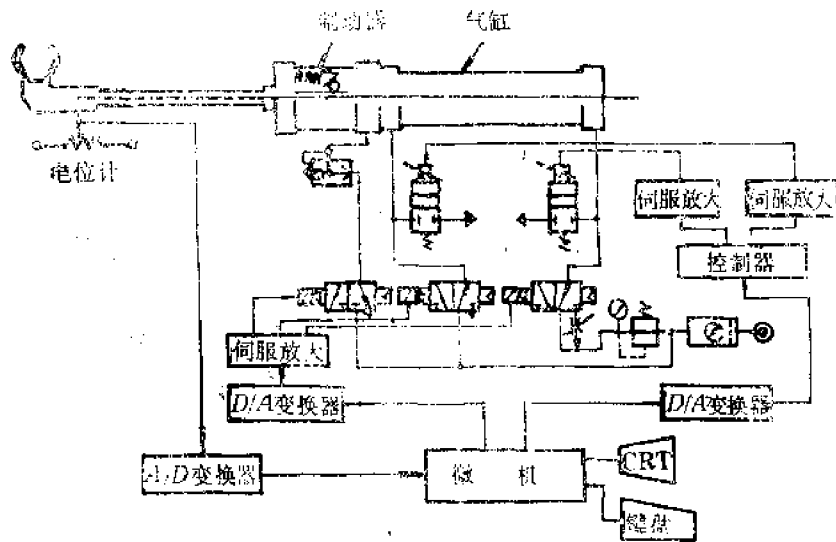
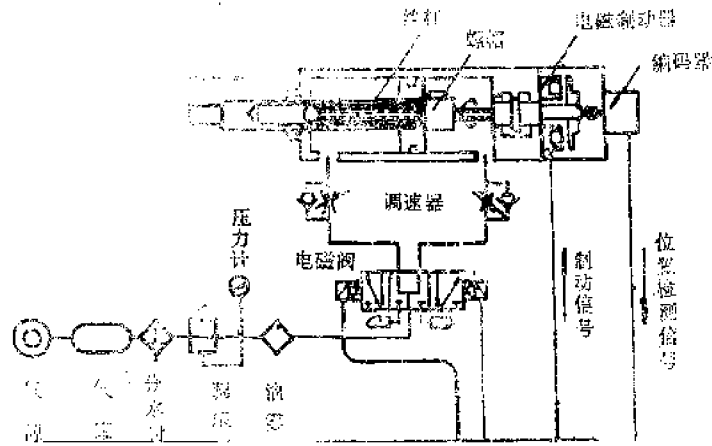


图6-17 用制动气缸的工业机器人手臂控制系统

通过D/A变换器将此控制量变成模拟电压，经过PID控制器将电流信号传给流量比例电磁阀。流量比例电磁阀通过调节气缸的排气量进行速度调节。当检测位置进入目标区域内时，进行分段减速，在给定位置之前使3通电磁阀动作进行制动。

图6-18是在气缸的活塞部装有丝杆螺母，在其旋转部分装有电磁制动器与旋转编码器。当由程序控制器或微机出来的给定信号加给控制装置时，由控制装置把前进（后退）信号传给3位5通电磁阀的同时，把电磁制动器松开，气缸开始运动。与气缸运动的同时螺母旋转，通过旋转编码器把位置检测信号反馈到控制装置。当到达给定位置

时，给电磁制动器加入制动信号后使活塞杆停止。通过位置修正机能的作用，位置停止精度可达到 $\pm 0.3\text{mm}$ 。通过给定示教数值可以给定多点位置，最小可给定到 1mm 。动作速度为 250mm/s ，用于简易机器人的手臂控制系统。



的。

图6-20是用气动伺服阀控制的关节式机器人的例子。其中所用气动伺服阀的结构如图6-21所示，它是由发生与电信号成比例的力的磁铁和电磁线圈组成的力马达部分、按线圈中发生的力控制空气流量的转换放大部分以及输出指示计构成的。

当电气指令信号加入伺服放大器时，由伺服放大器产生的偏差信号加给电磁线圈。在磁铁与电磁线圈中产生力，根据此力挡板绕支点中心进行左（右）摆动时改变由喷嘴喷出的空气流量，使喷嘴背压变化。喷嘴背压是通过图6-22所示的转换器使流量变换与放大之后变成气动输出而驱动气缸。如偏差信号为零时则左右转换放大器的输出相等，气缸即停止。

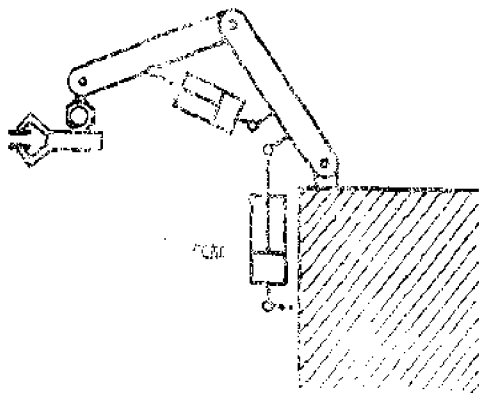


图6-20 气动关节式机器人

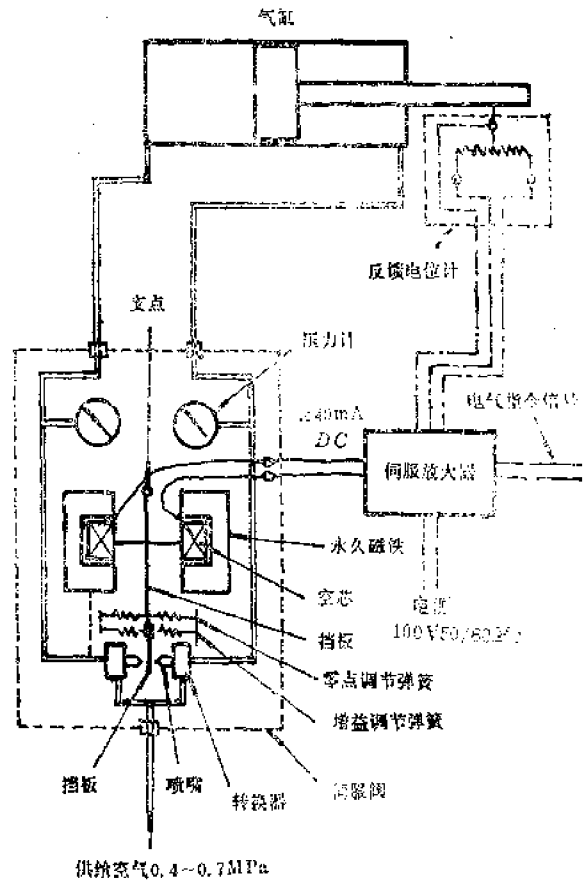


图6-21 气动伺服阀原理图

使用气动伺服阀的气动伺服机构的组成如图6-23所示。

气动的弱点是①响应慢；②由于空气的粘性阻力小容易发振；③易受干扰（重力、外力与静止摩擦力）的影响。

关于响应性如若增大开环增益即可，但是这样做易引起振动，所以在此系统中将输出位移及其微分反馈，再加入局部压力反应用以改善其响应性。解决发振的措

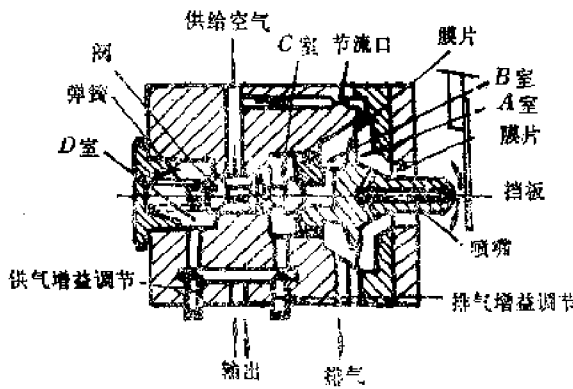


图6-22 转换器结构

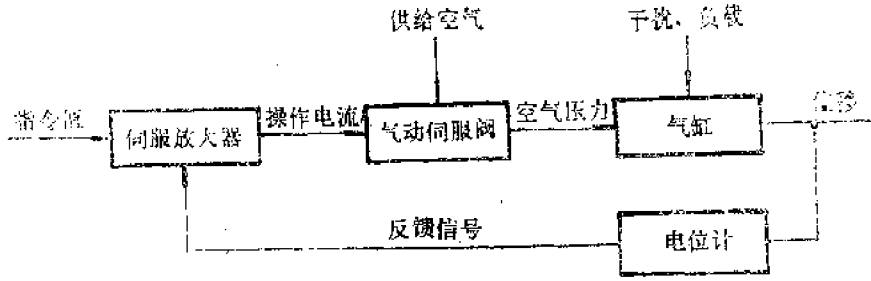


图6-23 气动伺服机构

施是以主反馈中加入微分补偿以增加电气阻尼。微分运算是使用测速发电机。关于干扰问题是通过气缸内的压力差和活塞杆力的局部反馈加以改善。

图6-24是特性改善后的方框图，图6-25是经速度反馈后伺服系统的阶跃响应。

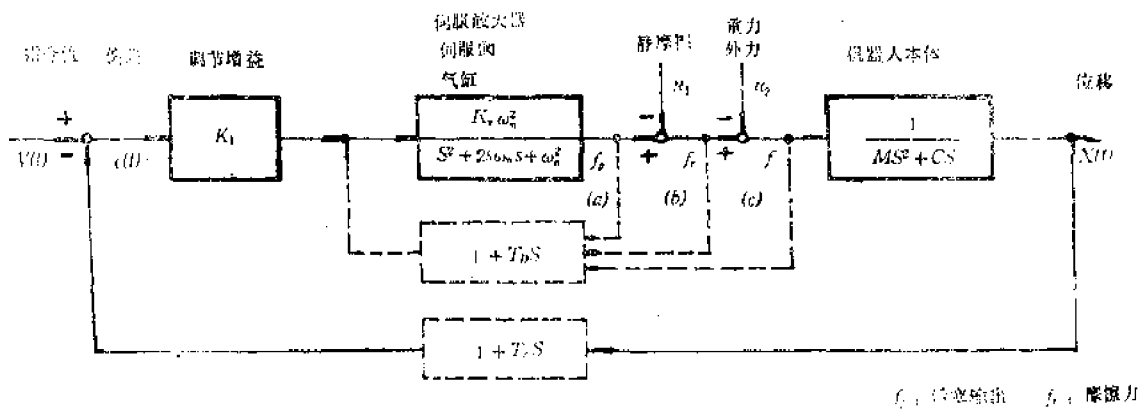


图6-24 气动工业机器人伺服系统

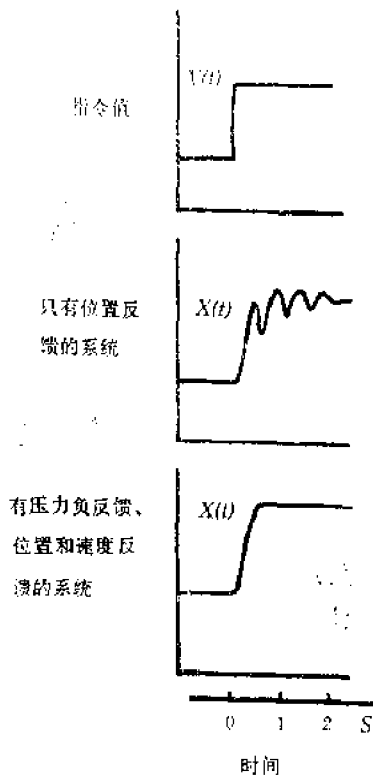


图6-25 速度反馈补偿的阶跃响应

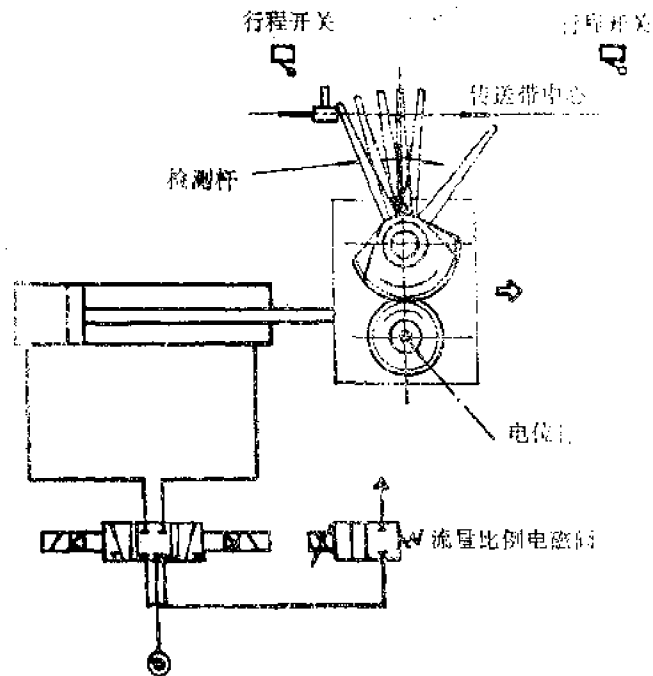


图6-26 用流量比例电磁阀的同步装置

下面介绍使用流量比例电磁阀机器人的手臂同步装置。

为了使连续运动的传送带与工业机器人的手臂或本体进行同步运动，检测出与传送带的相对位置或速度，驱动直流马达或应用气动技术的方法都在实际应用着。

图6-26是用流量比例电磁阀由传送带的吊架自动地移动同步装置。

其动作原理是，由跟踪吊架传感器的电位计检测与传送带的相对位置，通过伺服放大器加给流量比例电磁阀以控制3位5通电磁阀的排气量，使其与传送带同步运动而移动工件。而3位5通电磁阀由传送带的吊架碰撞行程开关进行换向则气缸前进。

4. 气电混合方式的位置控制系统

把电气与气动组合起来的混合方式是一种改善气动执行机构位置精度的方法。这是小输出的电气驱动的步进马达与大输出气动执行机构的组合，可用于直线运动与旋转运动。直线运动的如图6-27所示，是气缸与小输出的步进马达（5W，200步/转，最大力矩0.5N·m），活塞通过螺杆与步进马达连接。

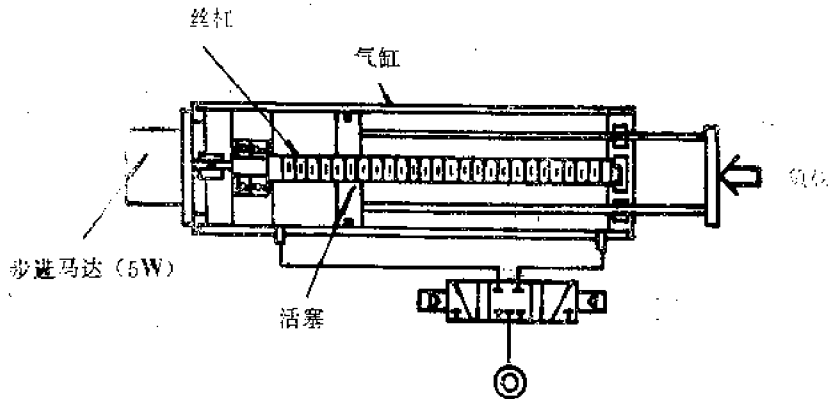


图6-27 气电混合式机器人直线运动机构

当向给定位置前进（或后退）的指令由微机给出后，则5通电磁阀换向使气缸前进（或后退）。与此同时步进马达也得到与给定位置相当的脉冲输入。负载由气缸推动，而步进马达只是用于给定位置所以输出小。即使外力负载加在活塞杆上，由于螺杆的螺

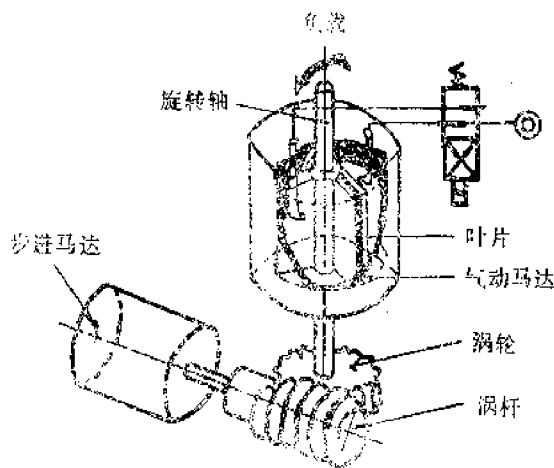


图6-28 气电混合式机器人旋转运动机构

纹升角很小，使螺杆旋转的力很小。因此形成与制动器一样的自锁机构。步进马达每转的活塞位移量为0.02mm，螺杆螺距为4mm，活塞直径为61.8mm，行程300mm，最大速度300mm/s，摩擦力为26.5N（2.7kgf），位置重复精度为65μm。

图6-28是工业机器人手臂旋转用的机构，在叶片式气动马达的轴端装有涡轮，在蜗杆上装有步进马达。位置控制是通过小输出的步进马达进行数值控制。对来自外部的大负载通过涡轮实现自锁。

气动马达的叶片面积为22cm²，旋转

角 180° ，步进马达每转的旋转角度为 0.06° ，最大旋转速度为 $90^\circ/s$ ，负载为 $11\text{N}\cdot\text{m}$ 时，位置的复现精度为 3.8° 。

二 工业机器人的力控制系统

工业机器人用于装配作业时，必须进行力的检测与控制。例如

- ① 检测插入时的异常力，
- ② 在扭紧螺钉作业时，沿螺钉前进方向的一定压紧力，
- ③ 作业时对工件一定压紧力控制，
- ④ 对工件夹具基准面的一定压紧力，
- ⑤ 齿轮啮合时的力检测等。

这些在装配时的力控制都是上下和前后方向的，多数情况都是进行上下方向的力控制。而目前力的检测精度还不高。

工业机器人的力检测与控制是通过检测驱动手臂的直流马达电流控制其输出电流而确定输出力矩的方法，或者在手腕、手指和动力传递部分装上应变仪进行检测与控制的方法。这些方法都使得控制装置的硬件及软件变为复杂，在可靠性与经济性方面都存在些问题。

这时，气动式力控制只要控制气缸的推力即控制空气压力就可以，所以进行力控制是很容易的。

图6-29是气动工业机器人的力控制系统实例，当被把持的工件与作业面接触时，以机械手手部接触器的信号加给压力比例电磁阀，通过按给定压力供给气缸，以气缸的推力 F ($F = KAp_0$ ， K ：按机构确定的推力效率， A ：活塞面积， p_0 ：供气压力)压紧。在该装置中压力比例电磁阀是给定导控型减压阀的控制压力。在机器人以高速进行上下运动时由压力比例电磁阀提供高的压力。

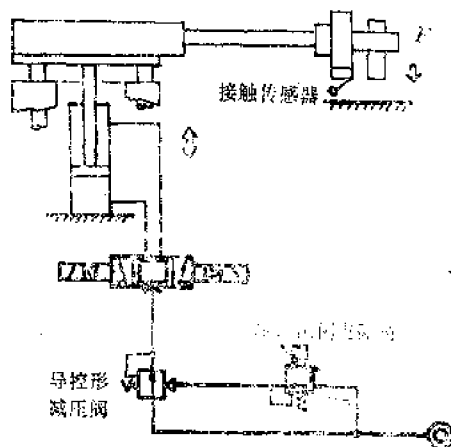


图6-29 用压力比例电磁阀的力控制系统

三 气动伺服系统的分析

下面介绍在惯性与摩擦负载作用下气动伺服系统的分析，图6-30是气动伺服系统的主要参数。

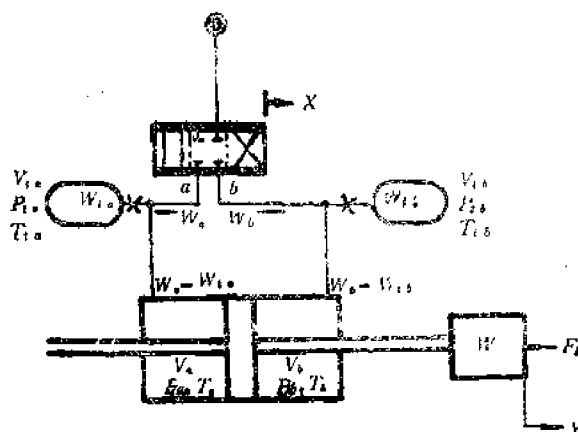


图6-30 气动伺服系统的主要参数

图中 $W_{i,a}$: 由a端流入气罐中的质量流量[kg/s],
 $W_{i,b}$: 由b端流入气罐中的质量流量[kg/s],
 g : 重力加速度[980cm/s²],
 C_p : 定压比热[cm²/s²·°K],
 V_a : a侧的气缸腔容积[cm³],
 V_b : b侧的气缸腔容积[cm³],
 t : 时间[s],
 k : 定压比热与定容比热的比 (空气为1.4),
 R : 气体常数[空气为2.28×10⁸cm²/s²·°K],
 X : 阀的位移,
 p_a : a侧气缸腔的压力[Pa],
 p_b : b侧气缸腔的压力[Pa],

由上述各参数得

$$W_a = f_a(X, p_a) \quad (6-23)$$

$$W_b = f_b(-X, p_b) \quad (6-24)$$

如对气缸的a腔与b腔写出运动方程式则

$$(W_a - W_{i,a})T_a - \frac{g p_a}{C_p} \cdot \frac{dV_a}{dt} = \frac{g}{kR} \cdot \frac{d}{dt}(p_a V_a) \quad (6-25)$$

$$(W_b - W_{i,b})T_b - \frac{g p_b}{C_p} \cdot \frac{dV_b}{dt} = \frac{g}{kR} \cdot \frac{d}{dt}(p_b V_b) \quad (6-26)$$

通过细管的气体流量以下式表示。

$$W = C_d A_0 f(p_u, T_u, \frac{p_d}{p_u}) \quad (6-27)$$

式中 W : 质量流量[kg/s],
 C_d : 节流孔与细管的流量系数,
 A_0 : 节流面积[cm²],
 p_u : 上流侧压力[Pa],
 T_u : 上流侧温度[°K],
 p_d : 下流侧压力[Pa],
 f : $p_u, T_u, p_d/p_u$ 的函数。

因此通过节流口的流量为

$$W_{i,a} = \frac{g C_c}{2 R T_s} (p_a^2 - p_{i,a}^2) \quad (6-28)$$

$$W_{i,b} = \frac{g C_c}{2 R T_s} (p_b^2 - p_{i,b}^2) \quad (6-29)$$

式中 C_c : 毛细管阻力系数[cm³/Pa·s],

p_{1a} : a侧气罐内压力[Pa],

p_{1b} : b侧气罐内压力[Pa]。

对公式(6-28)、(6-29)取适当的近似则

$$W_{1a} = -\frac{gC_c p_a}{RT_1} (p_a - p_{1a}) \quad (6-30)$$

$$W_{1b} = -\frac{gC_c p_b}{RT_1} (p_b - p_{1b}) \quad (6-31)$$

气罐中能量方程式为

$$W_{1a} T_1 = -\frac{gV_{1a}}{kR} \cdot \frac{d}{dt} (p_{1a}) \quad (6-32)$$

$$W_{1b} T_1 = -\frac{gV_{1b}}{kR} \cdot \frac{d}{dt} (p_{1b}) \quad (6-33)$$

对气缸活塞与负载质量用运动第二定律则

$$(p_a - p_b) A = m \frac{d^2 Y}{dt^2} + F_f + F_c \quad (6-34)$$

式中 A : 活塞的断面积[cm²],

Y : 活塞的位移[cm],

F_f : 外部负载力[N],

F_c : 摩擦力[N]。

活塞两腔容积 V_a , V_b 与 Y 的关系为

$$V_a = V_i + AY \quad (6-35)$$

$$V_b = V_i - AY \quad (6-36)$$

式中 Y 是 $V_a = V_b = V_i$ 的关系成立点的值。

阀的运动 X 、输入 Z 与输出位移 Y 的关系

$$X = k_i Z - k_f Y \quad (6-37)$$

式中 k_i : 输入的比例,

Z : 输入装置的位置,

k_f : 反馈的比例。

摩擦力是活塞运动时活塞速度独立一定的。活塞不运动时此力等于作用在活塞上的力以外所有力的和。即

$$F_c = \frac{dY}{dt} F_{c1} \dots \left[\frac{dY}{dt} > 0 \right] \quad (6-38)$$

$$F_c = (p_a - p_b) A - F_{f1} \dots \left[\frac{dY}{dt} = 0 \right] \quad (6-39)$$

式中 F_{i1} : F_i 的最大值[N]。

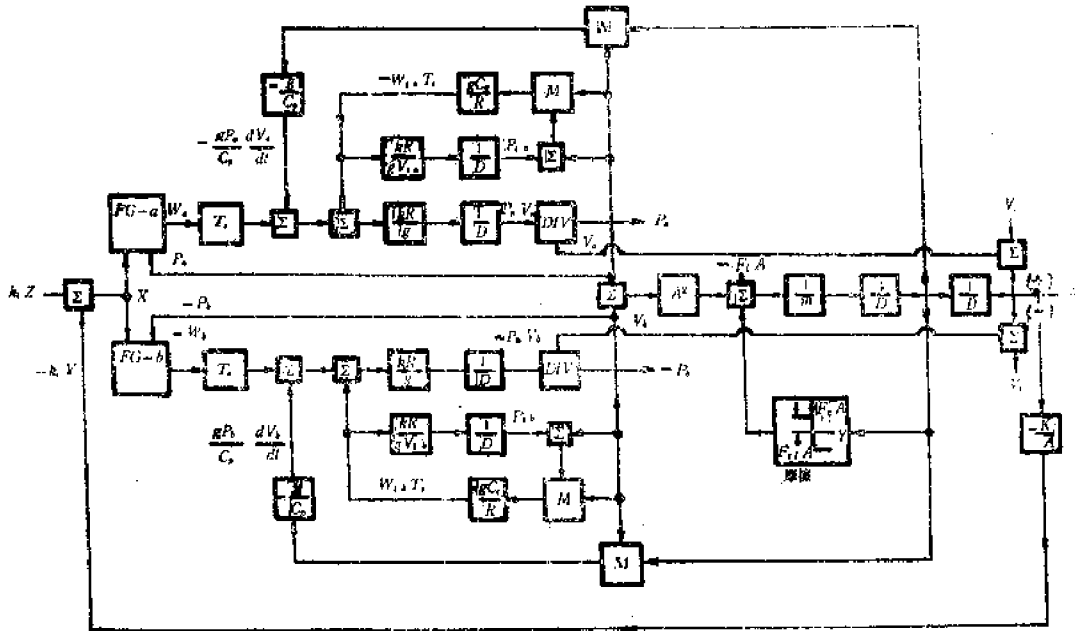


图6-31 气动系统方框图

图6-31是计算气动系统工作状态的计算机接线方框图。由此图可知道系统每个元件的物理特性或它们之间的相互作用影响。在进行这样的系统计算时，用模拟计算机是非常方便的，但也可用数字计算机进行计算。虽然进行上述计算是很繁杂的，但是用以检查气动系统设计还是非常有必要的。

§ 6-3 气动行程程序回路的设计方法

一 概述

程序控制（简称程控）是实现自动化广泛采用的一种控制方法。程序控制可分为行程程序控制和时间程序控制两类。根据要求也有采用行程与时间混合程序控制的。数字控制也是一种比较复杂的程控。这里主要介绍气动行程程序回路的设计方法。

简单行程程控与时间程控的一般组成方式如图6-32和图6-33所示。

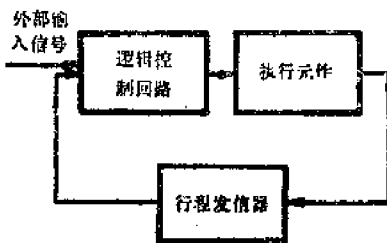


图6-32 行程程序控制方框图

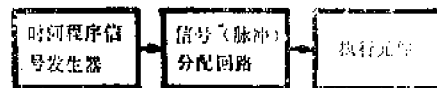


图6-33 时间程序控制方框图

框图中外输入信号是启动信号或其它装置来的信号。逻辑控制回路是由各种控制阀、逻辑元件（包括射流元件）形成的基本逻辑回路组合而成。执行元件为气缸、气马达

等。行程发信器是一种位置传感器，常用机控阀（行程阀）。时间程序发生器常用机械式码盘、环形计数器等。

由上面方框图可知，行程程序控制是指执行元件执行某一动作后，由行程发信器发出信号，此信号输入逻辑控制回路，由其作出判断发出有关执行信号，指挥执行元件执行下一步动作，此动作完成后，又发出新的信号，直到完成预定的控制为止。实际上，这是一种闭环控制系统。行程程序回路的设计方法有信号-动作状态线图法（简称 $X-D$ 线法）、分组供气法、卡诺图法等。下面只介绍信号动作状态线图法。这种方法直观、简便，适应于较复杂回路的设计。

信号动作线图法是利用绘制信号动作线图的办法设计出气动控制回路。此法的设计步骤大致如下：

- (一) 根据生产自动化的工艺要求，写出工作程序；
- (二) 绘制信号动作线图；
- (三) 分析并排除控制障碍；
- (四) 绘制逻辑原理图和气动回路原理图。

在分析信号动作线图之前首先把常用的符号规定如下：

1. 用大写字母 A 、 B 、 C 等表示气缸，用下标“1”与“0”表示气缸活塞杆的两种不同的状态，如 A_1 表示气缸 A 活塞杆伸出状态， A_0 表示气缸 A 活塞杆的收回状态。 B_1 表示气缸 B 活塞杆的伸出状态， B_0 表示气缸 B 活塞杆的收回状态（见图 6-34）。

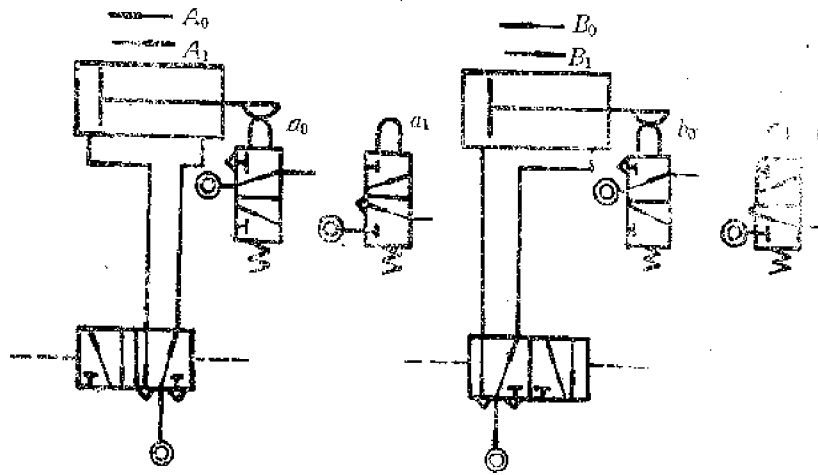


图 6-34 气缸、行程阀符号

2. 用带下标的小写字母 a_1 、 a_0 、 b_1 、 b_0 等分别表示与动作 A_1 、 A_0 、 B_1 、 B_0 等相对应的行程阀及其输出信号。如 a_1 对应于缸 A 活塞伸出位置的行程阀和其输出的信号， b_0 对应于缸 B 活塞杆收回位置的行程阀和输出的信号。

3. 右上角带 * 号的信号称其为执行信号，如 a_0^* 、 a_1^* 、 b_0^* 、 b_1^* 、 y_0^* 、 y_1^* ……等；而把不带 * 号的信号叫做原始信号如 a_0 、 b_0 ……等。下面将会介绍，执行信号必须是经过逻辑处理而排除障碍的信号。

二 气动行程程序回路的设计

(一) 列出工作程序

在对控制对象经过调查研究的基础上,明确控制执行元件的数目、动作顺序、自动、手动、联锁保护等要求,列出工作程序。下面举例说明:

例题 某专用气动机械手的结构示意图如图6-35所示,它由四个气缸所组成,能在三个座标内工作。

其工作程序如图6-36a所示。

控制要求是:手动启动后,上述程序由第一个自动延续到最后一个程序。

由上述工作程序可知,要控制的执行元件数目是四个,即:正、反转,下降、升起,夹紧、松开、伸出、缩回。相应地把它们编成号为: A_1 、 A_0 、 B_1 、 B_0 、 C_1 、 C_0 、 D_1 、 D_0 八个状态。并把两个相邻程序动作之间加上相应的行程阀(输出信号),如 A_1 之后加上 a_1 、 D_1 之后加上 d_1 ,同时。在每一动作状态下边标上程序号。其工作程序如图6-36所示。

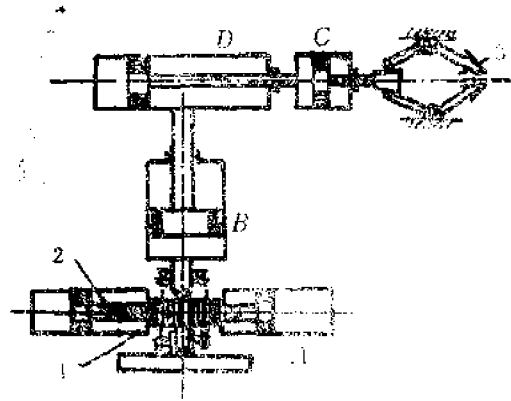
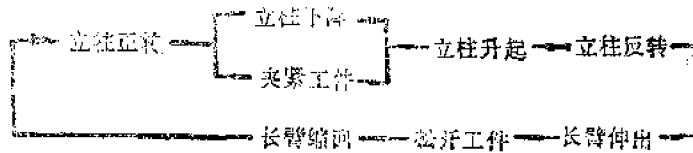
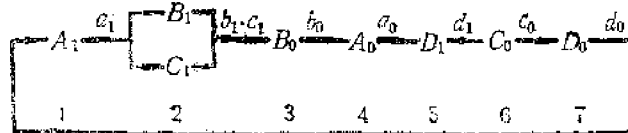


图6-35 气动机械手示意图

A —立柱回转缸; B —立柱升降缸; C —夹紧缸;
 D —长臂伸缩缸; 1—阴轮; 2—齿条; 3—手爪



a) 气动机械手工作程序图之一



b) 气动机械手工作程序图之二

图6-36 气动机械手工作程序

图中: “→” 指向表示控制顺序, 如 $b_0 \rightarrow A_1$ 表示 b_0 控制 A 缸缩回动作, “ $\left[\begin{array}{l} \rightarrow \\ \rightarrow \end{array} \right]$ ” 表

示一个信号同时控制两个动作, 如图中 a_1 同时控制 B_1 、 C_1 , “ $\left[\begin{array}{l} \rightarrow \\ \rightarrow \end{array} \right]$ ” 表示两个信号有联锁要求, 如图 b_1 与 c_1 同时有信号时才控制 B_0 的动作。

(二) 绘制信号-动作状态线图(X-D线图)

多缸单往复系统X-D线图的绘制

所谓多缸单往复系统是指在一个循环中每个气缸只作一次往复运动的系统，在此系统中每个行程开关在一个循环中只发出一个信号，该信号所控制的动作是固定不变的（见图6-36）。

(1) 画方格图（如图6-37）

根据上面列出的工作程序，由左至右画方格并在方格的顶上依次填上程序序号1、2……，在序号下面填上相应的动作状态 A_1 、 B_1 、 C_1 、 B_0 ……，在最右边留一栏做为“执行信号表达式”。在方格图最左边纵栏由上至下填上控制信号及控制动作状态组的序号（下面称 $X-D$ 组）1、2、……。每一个 $X-D$ 组包括上下两行，上行为行程信号行，如 $d_0(A_1)$ 、 $a_1(B_1)$ ……；下行为该信号控制的动作状态，如 A_1 、 B_1 ……。 $d_0(A_1)$ 表示控制 A_1 动作的信号是 d_0 ， $a_1(B_1)$ 表示控制 B_1 动作的信号是 a_1 。对于一个 $X-D$ 组中，一个信号同时控制两个动作的情况（如图中第2组）也应分别写出。对有联锁要求的信号通常在方格图下方的备用格中确定好联锁输出信号（如 $y^* = b_1 \cdot c_1$ ），以后再引入 $X-D$ 组的相应格内[如图中第3组 $y^*(B_0)$]。图6-37为气动机械手回路设计中绘制的 $X-D$ 线图的方格图。

X-D 组		程 序						执行信号 表达式
		1	2	3	4	5	6	
		A_1	B_1 C_1	B_0	A_0	D_1	C_0	D_0
1	$d_0(A_1)$ A_1							
2	$a_1(B_1)$ B_1 $a_1(C_1)$ C_1							
3	$y^*(B_0)$ B_0							
4	$b_0(A_0)$ A_0							
5	$a_0(D_1)$ D_1							
6	$d_1(C_0)$ C_0							
7	$C_0(D_0)$ D_0							
备用格	b_1 c_1 $y^*(L_0) = b_1 c_1$							

图6-37 气动机械手 $X-D$ 线图的方格图

(2) 画动作状态线（ D 线）

下面以气动机械手动作为例说明动作线图的画法。如图6-38所示，用横粗实线画出了各执行元件的动作状态线。画法如下：

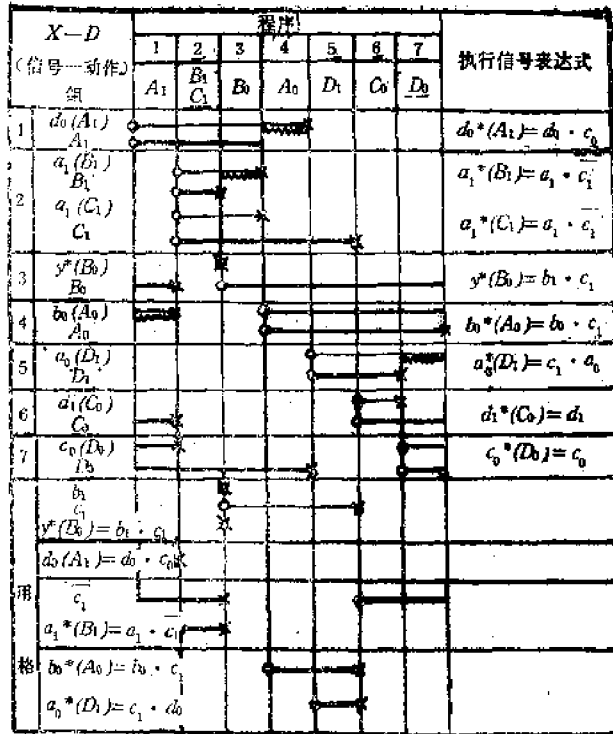


图6-38 气动机械手的X-D线图

动作状态线的起点 是该动作程序的开始处。例如A缸伸出动作 A_1 位于第一组，第一程序开始处。图上由第一程序开始用“○”符号画出。

动作状态线的终点 是该动作状态变化的开始处。例如A缸伸出状态 A_1 转换成A缸的缩回状态 A_0 ，必然在 A_0 的开始处。在此 A_0 位于第4组，第4程序的开始处。图上用“×”号画出。

因此 A_1 的动作状态线应从第1程序开始画到第4程序开始前为止。其余 C_1 、 D_1 ……动作状态线的画法与 A_1 的画法相类似。

画动作状态线时需注意：第7程序与第1程序是循环闭合的特点。如画第3组的 B_0 是由第3程序起画到第7程序以后返回画到第2程序开始为止。

(3) 画信号线 (X线)

用横的细实线在图6-38上画出了行程信号线。信号线的画法如下：

信号线的起点 与同一组中动作状态线的起点相同。如信号 d_0 控制A缸伸出动作 A_1 ，则 d_0 的起点与 A_1 相同。如信号 a_1 控制B缸的伸出动作 B_1 ，则其起点与 B_1 相同。起点符号也都用“○”号表示。

信号线的终点 是和上一组中产生该信号的动作线终点相同。如第1组 d_0 的终点是和它上一组（即第7组）产生该信号的 D_0 动作线的终点相同。又如第2组 a_1 的终点是和它上一组（即第1组）产生该信号的动作线 A_1 的终点相同。信号线的终点也都用“×”号表示。

从图6-38上不难看出：纵向程序的分界线实际就是执行元件的切换线，信号线的起点就是信号的执行点。但考虑到阀的切换及气缸启动等的传递时间，信号线的起点应超前于它所控制动作的起点，而信号线的终点应滞后于产生该信号动作线的终点。若在图

上反应这种情况，则要求信号线的起点与终点都应伸出分界线。但因这个值很小，除特殊情况外一般不予考虑。

画信号线应注意以下两点：

1) 如果信号线起点与终点在同一条纵向分界线上出现“ \times ”图线时，即表示该动作作为脉冲信号。该脉冲信号的宽度相当于行程阀发信、气控阀换向、气缸启动和信号传递时间的总和。

2) 如几个执行元件要求为联锁信号，则信号线的终点取决于联锁信号几个相关信号逻辑运算的结果。例如图中第3组 $y^*(B_0)$ 联锁信号就是由逻辑运算（见图6-38中备用格 $y^*(B_0) = b_1 \cdot c_1$ ）得到的，而后才移到第3组2、3程序的交界处。

(三) 确定并排除障碍信号，找出执行信号

1. 障碍信号的确定 用X-D线图设计气动回路时，很重要的问题是确定障碍信号并排除障碍信号。为找出障碍信号就要对前边画出的信号动作线图进行分析，检查每组中是否存在有信号线比所控制的动作线长的情况，如存在此情况，说明信号与动作不协调，即动作状态要改变，而其控制信号不允许其改变(障碍动作状态的改变)，这种障碍其动作改变的信号就称之为障碍信号。信号线比其所控制动作线长的那部分线段就叫障碍段，即图6-38上用“ \sim ”波浪线表示的线段。设计时，必须把有障碍信号的障碍段去掉，使其变为无障碍信号再去控制主换向阀，这种信号叫执行信号，图上用“*”号表示执行信号（均写在最右边执行信号表达式栏中）。

上述多缸单往复系统中所产生的障碍称为I型障碍。如图6-38中第一组的 $d_0(A_1)$ ，第2组的 $a_1(B_1)$ 、第4组的 $b_0(A_0)$ 和第5组的 $a_0(D_1)$ 各信号的障碍信号都是I型障碍（画“ \sim ”的线段）。

另一类型障碍即II型障碍。II型障碍是多缸多往复系统中多次信号所产生的障碍。在一个循环中只出现一次，不是多次出现，它的障碍不是II型障碍，而属于I型障碍。无论I型还是II型障碍都必须排除掉。首先来分析如何排除I型障碍。

2. I型障碍信号的排除 I型障碍信号的产生就是因为控制信号线比其所控制的动作线长或有信号线而无对应的动作，排除障碍的实质就是缩短控制信号存在的时间，使长信号变为短信号（信号线最长等于它所控制的动作线）。

具体排除I型障碍的方法有脉冲信号法和逻辑回路法。

(1) 脉冲信号法

此法可将有障碍的原始信号变成脉冲信号，它可以排除所有的I型障碍。具体的方法

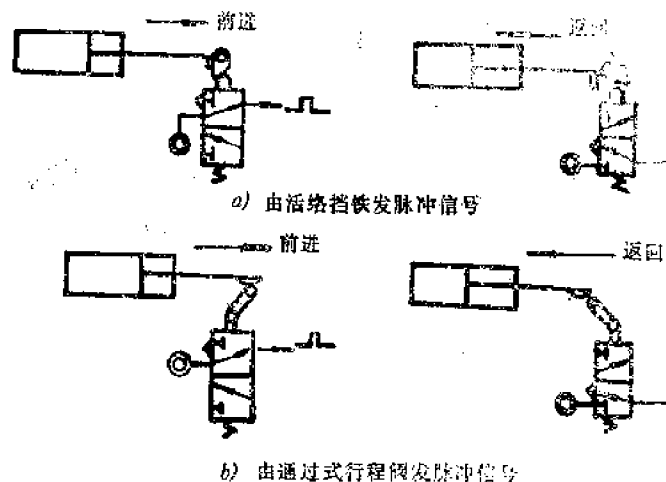


图6-39 单方向发脉冲信号

是：

1) 采用机械活络挡铁或可通过式行程阀。如图6-39a)所示,当活塞杆伸出时(有时可用收回),活络挡铁压行程阀发出脉冲信号;活塞杆收回时,活络挡铁绕轴转动通过行程阀不发信号,使行程阀把长信号变为短信号。图b)为用可通过式行程阀发脉冲信号,活塞杆前进时压下行程阀发出脉冲信号;活塞杆返回时因行程阀的头部具有折性,没把阀压下使阀不发信号。用上述方法安装行程阀时必须注意:不可把行程阀装在行程的末端,而应留一段距离,以便挡铁或凸轮能通过。而这样做,必然使行程阀在行程终了之前就发出信号,所以此法不能用行程阀限制气缸的行程,必须用死挡铁机械限位。上述方法排除障碍简单易行,可节省气动元件及管路,适用于定位精度要求不高,活塞运动速度不太大的场合。

2) 采用脉冲阀或脉冲形成回路排除 I 型障碍。如图6-40a)所示,当行程阀1被压下后发出长信号,脉冲阀2也立即有信号输出,经短暂时刻气容充气,当气容的压力达到脉冲阀的切换压力,阀2被切换,输出被切断,因此它输出的是脉冲信号。图b)所示是用差压控制的脉冲阀回路,当行程阀1被压下,差压脉冲阀2有输出信号,过短暂时刻气容充气,因阀2的下边压力大于上边压力,差压脉冲阀被切换,输出信号被切断。它发出的也是脉冲信号。该回路当系统启动、气源接通时,行程阀1可能被压下而发出不应有的“假脉冲信号”,会使系统产生误动作。图c)是有启动保护的脉冲控制回路。它在脉冲阀2和换向阀4之间加了一个二位三通常断式换向阀3,当气源接通时,由于阀3处于常断状态,因此启动时阀1产生的“假脉冲信号”被阀3所阻止,不会使阀4换向,起到了保护作用。

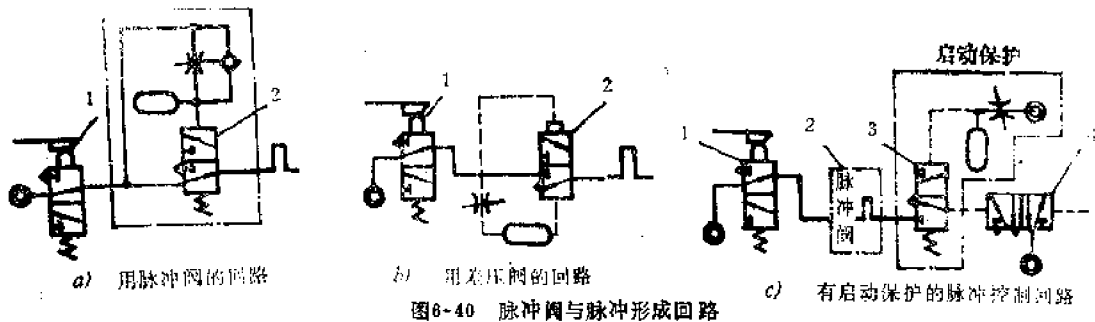


图6-40 脉冲阀与脉冲形成回路

采用脉冲阀或脉冲形成回路排除障碍,必须注意把脉冲阀的脉冲宽度事先调节好,使其脉冲宽度既能排除障碍又足以完成所需要的动作要求。上述方法适用于定位精度要求较高的场合。

(2) 逻辑回路法排除 I 型障碍

1) 由“与门”逻辑元件排除障碍(图6-41)

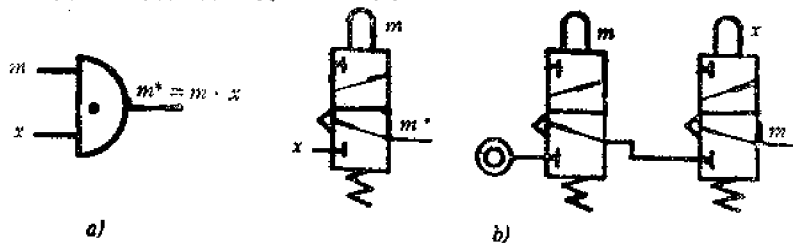


图6-41 “与门”排除障碍

为了排除某有障碍信号 m 的障碍信号, 需另外引入一个辅助信号(称其为制约信号) x 和 m 相“与”而得到无障碍的派生信号 m^* , 逻辑“与”消除障碍的表达式为:

$$m^* = m \cdot x \quad (6-40)$$

式中 m 是有障碍的信号; x 是制约信号, 即用来排除障碍的辅助信号。因 m^* 在 m 信号有障碍之前已经结束, 所以 m^* 是无障碍的执行信号[如图6-38右栏中 $d_0^*(A_1)$ 、 $a_0^*(B_1)$...各信号]。

现在的问题是如何选择制约信号 x 以满足排除障碍的要求。选择制约信号 x 的原则是:

x 在障碍信号 m 的执行段应该存在, 在 m 的障碍段不应该存在。

如图6-42所示, 制约信号 x 的起始点应选在障碍信号 m 开始之前及 m 障碍段之后范围中(图中3区域)。 x 的终点应选在障碍信号 m 的无障碍段中。

一般尽量用系统中某原始信号或主控阀的输出信号作为制约信号。

如图6-38中, 为排除信号 $d_0(A_1)$ 的障碍段, 可选择在 d_0 之前出现的、终止于 d_0 无障碍段内的信号 c_0 作为制约信号, 即 $d_0^*(A_1) = d_0 \cdot c_0$ 。

同样道理为排除 $a_1(B_1)$ 、 $b_0(A_0)$ 和 a_0

D_1) 的障碍段, 分别选择了 c_1 、 c_1 和 c_1 作为制约信号。

2) 用中间记忆元件排除 I 型障碍

若在信号动作线上找不到直接可用来作制约信号的信号时, 可采用中间记忆元件排除障碍。即用中间记忆元件的输出信号作制约信号和有障碍的信号 m 相“与”排除掉 m 中的障碍(如图6-43a所示)。其消障表达式为:

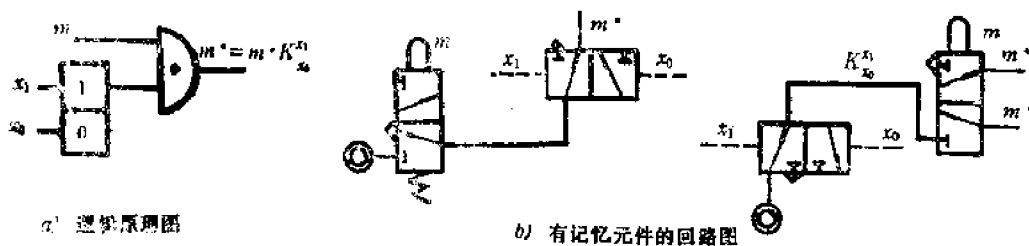


图6-43 采用中间记忆元排除

$$m^* = m \cdot K_{x_1 x_0}^{\cdot} \quad (6-41)$$

式中 m : 有障碍的信号;

m^* : 排障后的执行信号;

$K_{x_1 x_0}^{\cdot}$: 中间记忆元件(辅助元件)输出信号;

x_1 、 x_0 : 分别为记忆阀 K 的两个控制信号。

如图6-43b所示, $K_{x_0}^{x_1}$ ——常为双气控二位三通(或二位五通)阀, 当 x_1 有气时使 K 阀有输出, 而当 x_0 有气时 K 阀无输出。很明显 x_1 与 x_0 不能同时存在, 只能一先一后存在, x_1 或 x_0 可用脉冲阀得到。选择 K 阀的原则是(见图6-44)。

x_1 : 使 K 阀“通”的信号, 其起点应选在有障碍信号 m 的无障碍段之前有障碍段之后或与 m 同时, 其终点应在 x_1 起点至 m 的无障碍段之中这段范围内。

x_0 : 使 K 阀“断”的信号, 其起点应选在 m 信号起点之后到障碍段之前, 其终点应选在 x_1 起点之前。

(四) 气动回路的简化及对操作要求等的考虑

控制一个动作可以有多种回路方案, 因此需要从合理、可靠、经济性出发对回路进行分析、简化。为满足系统工作中的复位、启动、急停、自动、手动及联锁保护操作要求在回路设计中也必须加以考虑。

回路的简化方法 气动回路常用的简化方法有:

(1) 用弹簧及单向控制阀(或单作用缸)代替双向控制阀

如图6-45b所示简化后的回路, 都靠弹簧复位。它们适用于信号线与动作线等长的情况, 即 $\begin{matrix} x \\ \bigcirc \\ x \end{matrix}$ 。简化后的回路节省了管路(x_0 信号的), 可省去置“0”信号或行程开关, 如要求不高时可直接用单作用缸。

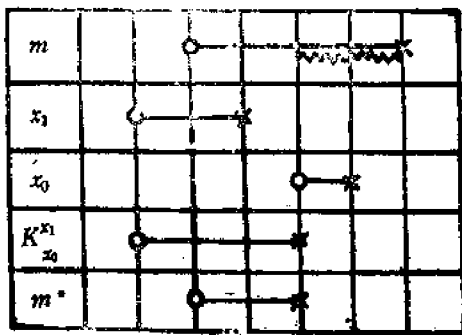


图6-44 记忆元件的选择

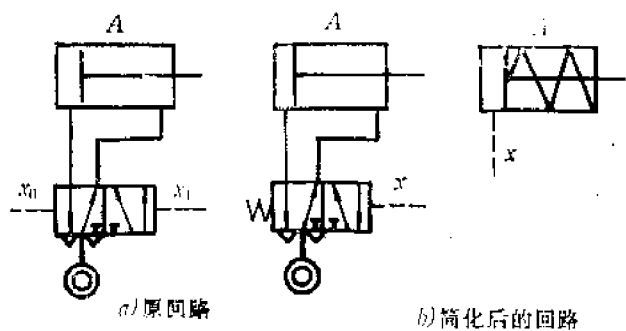


图6-45 用弹簧复位阀或缸简化回路

(2) 用“禁门”回路及差压阀

一般由信号 x_1 、 x_0 、先后去控制主阀时(如图6-46 a)所示)为消除 x_1 的障碍信号, 常常要引入一个中间记忆元件(如二位三通阀), 使 x_1 消障后再控制主阀, 但若采用如图6-46b)所示的

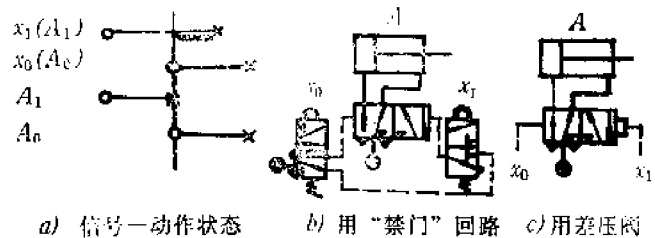


图6-46 用“禁门”回路及差压阀对回路简化

“禁门”回路, 使 x_1 的气源来自 x_0 。当 x_0 有输出时 x_1 就无输出, 消除了 x_1 的障碍。从而省去了消除 x_1 障碍的中间记忆元件(如二位三通阀)。若用图6-46c)的差压阀就更简单了。

(3) 用阀的合并法

如果需要倒相信号时，可用一个二位五通阀代替两个二位三通阀。图6-47a)、c)为原回路；b)、d)为简化后的回路。使用时需注意：被代替的二位三通阀（如辅助阀或主控阀）两个控制信号如 a_0 、 b_1 均需是无障碍的信号。简化后的回路节省了元件，但如把主控阀取消用行程阀代替时，只适用小气缸的场合，因行程阀流量小。

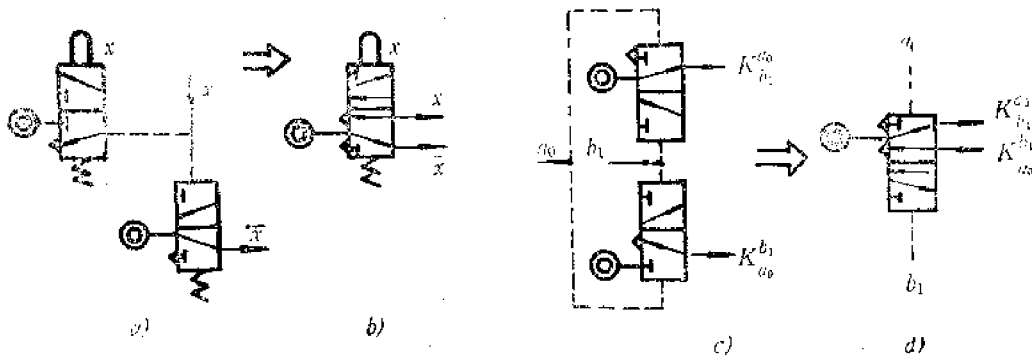


图6-47 用一个2位5通阀代替二个2位3通阀

(五) 绘制气控逻辑原理图与气控回路原理图

1. 气控逻辑原理图的绘制

气控逻辑原理图是根据 $X-D$ 线图的执行信号表达式及考虑手动、启动、复位等所画出的逻辑方框图。当画出逻辑原理图后，再根据它可以很快地画出气动回路原理图。因此，它是由 $X-D$ 线图画出回路原理图的桥梁。

逻辑原理图上的各个元件，可以由阀类元件或逻辑元件及射流元件组成，具体用哪类合适要经分析比较再定。

(1) 气动逻辑原理图的基本组成及符号

1) 逻辑控制回路主要是由“是”、“或”、“与”、“非”、“记忆”等逻辑符号表示。要注意：其中任一符号可理解为逻辑运算符，不一定总代表某一确定的元件，因逻辑图上的某逻辑符号在气动回路原理图上可由多种方案表示，如“与”逻辑符号可以是一种逻辑元件，也可由两个气阀串联而成。

2) 行程发信装置主要是行程阀，也包括外部信号输入装置如启动阀、复位阀等。这些符号加上小方框表示各种原始信号，而在小方框上方相应的符号者表示各种手动阀（见图6-48左侧）。

3) 执行元件的操纵图由主控阀的输出表示。因主控阀常具有记忆能力，可以用逻辑记忆符号表示。

(2) 气动逻辑原理图的画法

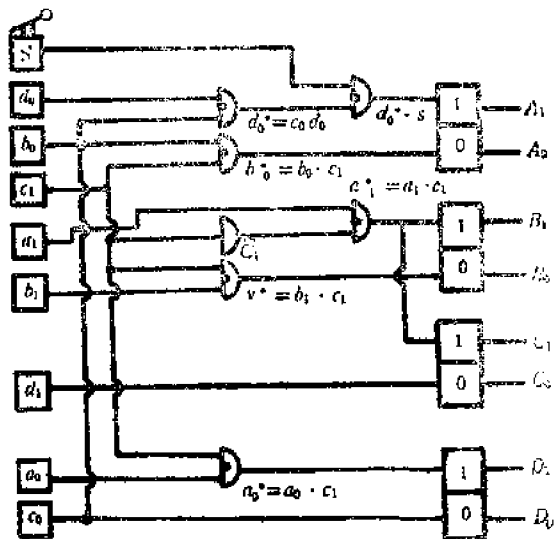


图6-48 气动机械手逻辑原理图

主要根据 $X-D$ 线图中执行信号栏的逻辑表达式，用上述符号画出的。步骤如下：

- 1) 把系统中每个执行元件的两种状态与主控阀相连后，自上而下一个个画在图的右侧。
- 2) 把发信器（如行程阀等）大致对应其所控制的元件，一个个列于图的左侧。
- 3) 在图上要反映出执行信号的逻辑表达式中逻辑符号之间关系，并画出为操作必要增加的阀（如手动阀）。

图6-48所示为例题气动机械手的气控逻辑原理图。图右列出四个缸的八个状态 A_1 、 A_0 、 B_1 、 B_0 ……和它们相对应的四个主控阀。左侧列出的是手动阀及行程阀 s 、 d_0 、 b_0 ……，行程阀上下的顺序并无严格要求。但应注意：

第一、尽量使被控状态与相应信号在相近的横向上，如 d_0 与 A_1 、 b_0 与 A_0 、 b_1 与 B_0 等。这样可以减少信号连接线的相互交叉。

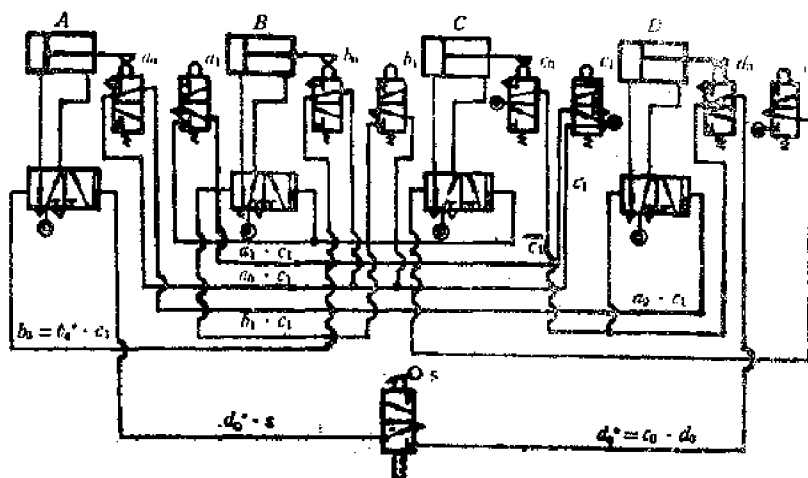


图6-49 气动机械手回路原理图之一（直观习惯画法）

第二、要正确反映每个执行信号的逻辑关系，如启动信号只在第一程序起作用，它与 d_0^* 信号相“与”的关系为 $d_0^* \cdot s$ 。而执行信号 d_0^* 是 d_0 与 c_0 相“与”的关系即 $d_0^* = d_0 \cdot c_0$ 。信号 b_0 与其控制对象 A_0 的关系是 $b_0^*(A_0) = b_0 \cdot c_1$ 。“非门” \bar{c}_1 与 a_1 信号相“与”后的执行信号 $a_1^* = a_1 \cdot \bar{c}_1$ 同时控制 B_1 和 C_1 ，其关系是： $a_1^*(B_1) = a_1 \cdot \bar{c}_1$ ， $a_1^*(C_1) = a_1 \cdot \bar{c}_1$ （见图6-48）。

2. 气控回路原理图的绘制

气控回路原理图是根据逻辑原理图绘制的。绘制时应注意以下几点：

(1) 要根据具体情况而选用气阀、逻辑元件或射流元件来实现。通常气阀及执行元件图形符号要按液压、气动国标表示，而射流元件要按通用符号表示。

(2) 一般规定工作程序图的最后程序终了时刻做为气动回路的初始位置（或静止位置），因此回路原理图上控制及行程阀的供气及进出口连接位置，应按回路初始静止位置的状态连接。

(3) 控制回路的连接一般用虚线表示,但对较复杂的气控系统,为防止连线过乱,建议用细实线代替虚线。

(4) “与”、“或”、“非”、“记忆”等逻辑关系的连接,可按气动的基本回路选取。逻辑相“与”的符号在回路上常用两个阀“串接”的方式,行程阀与启动阀常采用二位三通阀,有时根据需要为取出“非”的信号也可用二位五通阀。

(5) 绘制回路原理图时,应在图上写出工作程序或对操作要求的文字说明。

气动回路原理图的表示方法,有以下两种方法:

1) 直观习惯画法 其画法特点是:把系统中全部执行元件(如气缸、气马达等)水平或垂直排列,在执行元件的下面或左侧画上相对应的主控阀;而把行程阀直观地画在各气缸活塞杆伸缩状态对应的水平位置上。图6-49是根据图6-48逻辑原理图画出的气动机械手回路原理图。

2) 仿逻辑原理图画法 其画法特点是执行元件、行程阀、主控阀的布置仿照逻辑原理图的布置,如图6-50所示。各执行元件(缸)由上至下平行的排列在最右边,主控阀放在相应气缸的左下方,活塞杆伸缩两端点位置标注出相应行程阀的符号(如 a_0 、 a_1 、 b_0 、 b_1 等)。各行程阀大致排列在左边,各阀的接管方向是气源在左,输出口在右。

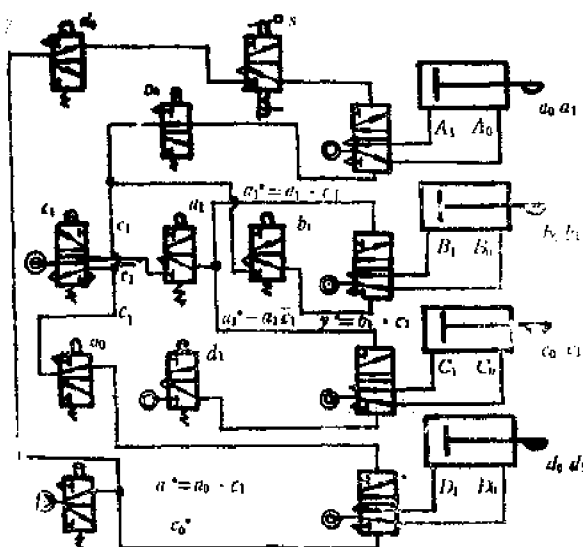


图6-50 气动机械手原理图之二

(仿逻辑原理图画法)

比较上述两种回路可以看出:直观习惯画法比较直观,但接线规律性差,交叉点多;仿逻辑原理图画法接线规律性较明显,连线较少,但直观性差。

第七章 液压关节式机器人的 研究与设计实践

§ 7-1 液压关节式机器人的发展概况

自从60年代前半期美国发表工业机器人以来,在工业界广泛地使用了机器人。近几年有关机器人本体的技术开发工作进展很快,无论是在机能、结构及使用动力等方面在实际应用中都有很多种类。下面从液压技术的角度对液压驱动式关节型机器人的有关问题进行简单的介绍。

一、关节型机器人的发展与使用情况

1. 关节型机器人的发展

机器人是在3维空间进行作业,能够实现此作业的结构之一是关节型的。开始的机器人结构是如图2-2的(a)、(b)两种方式。从它们的动作形态来看叫做圆柱坐标与极坐标。川崎Unimate 2600就是极座型的例子。同图(c)是直角坐标型,而川崎Unimate 3030就是这种型式。最初之所以采用这些型式的理由是结构简单控制容易。但是直角坐标型机器人就其作业范围而言,其设备占地面积大,并且进入狭窄部分较困难。与此相反,70年代后半期出现的关节型,如图2-2的(d)所示,是与人的上臂与前臂相似,以相当于肩、肘的两个旋转轴来驱动上述的两臂。关节型机器人由于其工作范围大、占地面积小的优点正在逐渐成为机器人的主要型式,但其缺点是控制较为复杂,而且提高机械刚度较困难,但是近几年由于控制技术的进步得到了解决。川崎Unimate 9753就是关节型喷漆机器人的例子。此外还有挪威Trallfa—3000 Trallfa—4000型也是液压关节型喷漆机器人,并且在Trallfa—4000型上使用了液压分离活塞和挠性手腕。

2. 使用状况

关节型液压机器人最初出现时主要是用于喷涂作业。这主要是因为喷涂作业要求防爆,而不能采用电动方式,这是液压机器人的单独工作领域。川崎Unimate 9753的喷涂机器人的参数如表7-1所示。

除了喷涂作业之外,还有装卸、切削、焊接、切割及研磨等。如果脱开录返型机器人的框框,人操纵型液压关节式机械手在土木、建筑及深海作业等方面也有应用。

表7-1 喷涂机器人的参数 (川崎Unimate 9753)

动作自由度		7	
动作范围·速度	轴	动作范围	速度
	左右行走	3000mm	800mm/s
	左右旋转	135°	110°/s
	前后旋转	70°	70°/s
	上下旋转	100°	100°/s
	手腕弯曲	220°	180°/s
	手腕旋转	360°	180°/s
	手腕扭转	360°	180°/s
可搬重量		5kgf	
位置重复精度		±1mm	
机械重量		1500kg	
液压源	常用压力	70kgf/cm ²	
	重量	500kg	

二 结构与组成元件

机器人系统是由手臂部分、控制装置及液压源组成。图7-1是全系统结构图，而手臂及油源在下面介绍。

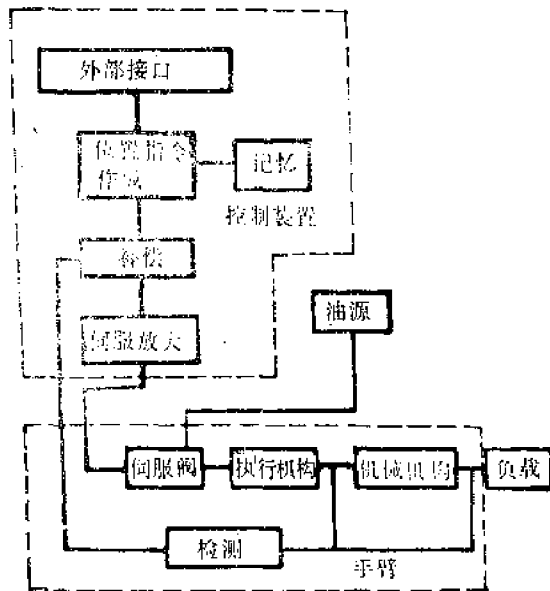


图7-1 全系统结构图

1. 各自由度的结构

关节型机器人的标准自由度结构如图2-1(d)所示，这样的机器人以基础部的第1关节确定手臂的方向，以第2、3关节在其垂直方向的平面内确定手腕部的位置。此外，还有在水平面内定位的水平关节型的自由度结构（上述型式叫垂直关节型），但是液压机器人没有水平关节的例子。

一般机器人的手部具有2或3个自由度。它们是在基础部分3自由度确定的空间位置上确定要求的姿势。原来，为了取得任意的姿势必须有独立的3个自由度，但由于作业的不同，有时也不需要全部姿势。

这时就使手部变成2个自由度了。

手部为2轴（自由度）时，如图7-2(a)所示，有上下方向的弯曲和端部的扭转是标准的形式。

手部3自由度的情况,有如图7-2(b)的上下弯曲和水平方向的摆动与扭转,或如同图(c)所示在2自由度手部的根部附加的扭转的两种形式。

关于手部自由度的选择,主要是根据作业对象的要求、机器人的结构及控制的容易程度等来确定。除了上述的形式之外,有时还设有与传送带同步使机器人本体平行移动的第7个自由度。

2. 驱动方式与传动机构

在以旋转运动驱动机器人的各关节时,可分为以执行机构直接驱动,或以某种传动机构使执行机构与关节轴连接的两类型式。

传动机构中链条、万向轴管、连杆等用得最多,此外在手腕部是以齿轮系传递动力的。

没有传动机构的直接驱动方式,由于在各关节上装有执行机构,所以使基础部分的负载增加,这是其缺点,但是其结构简单,且不用考虑传动机构的动力损失或间隙,因此可提高性能,所以这种形式将来可能日见增加。

另外有传动机构时则相反,虽然可减少负载,但是传动机构的摩擦、间隙及振动等对机器人的动作有不良的影响,可能使性能降低,所以在确定结构时必须仔细研究。例如,链条传动经过一定时间工作后,要修正链条的伸长,有时还需要校正基准位置。另外,有时手部3个自由度用小型的执行机构直接驱动反而比用齿轮系传动要好。

3. 执行机构

执行机构可大致分成直线运动型与旋转型。现在使用的直线运动型多数都是使用液压缸。其优点是价格便宜、可靠性高,但是把油缸用于关节型机器人时,总得通过某种传动机构把输出位移变成关节轴的旋转运动。

另外,做为直线运动型的例子,有使用直流马达或脉冲马达驱动内部装有滑阀的液压伺服油缸。正如以后将要介绍的,机器人的控制正在向数字化方向发展,而使用脉冲马达正适应这一潮流。

旋转型执行机构最常用的是叶片式摆动马达,虽然它有工作角度的限制和内部泄漏等缺点,但是其优点是结构简单、体积小,且力矩不变化,做为机器人的执行机构有可能实现必要的微速动作。其特点是执行机构本身又兼作关节,使轴和轴承得到强化的同时,其中还设有油路并可把液压油送到下一个自由度的执行机构或手部,浙江大学所研制的6自由度关节式液压伺服机械手中的叶片式液压马达就是属于这种型式的。

做为旋转型的此外还有用齿轮齿条把直线运动的油缸动作变成旋转运动,以及把连续旋转型液压马达与减速器组合起来的形式等,但其使用实例颇为少见。

旋转型执行机构,到目前为止其小型的主要是用于手部,但它也是适合于其它关节处的一种型式,今后随着价格与性能的改善用于手部以外的例子会越来越多。

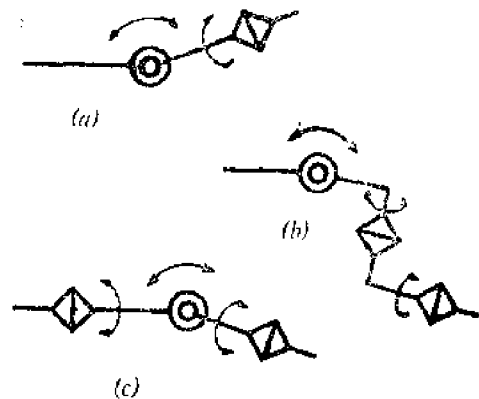


图7-2 手部的自由度结构

除了上述的执行机构以外，做为力的发生机构，关节型机器人经常是用弹簧等平衡重力，这样做的优点是可减少执行机构的负载，并且当能源关闭时容易保持机器人的正常姿势。

4. 伺服阀及其它控制阀

机器人使用的伺服阀其特点如下：①抗污染性能强；②寿命长；③内部泄漏少；④零点漂移要小；⑤为了保证伺服刚性所以压力增益要高；⑥动特性有几十赫兹就足够了；⑦对流量特性的线性要求不高；⑧价格便宜。这些要求与材料试验机等使用的普通伺服的要求是不同的。为此，即使多少牺牲些动特性也要保证对环境的适应性、可靠性和价格等，目前人们正在研究这样的机器人用伺服阀。具体的解决办法是增大滑阀间隙，采用正重叠的阀，增大滑阀行程和降低喷嘴挡板级的流量增益等。图7-3是川崎制的KS阀的流量特性，由于是平方特性，可以兼顾高速驱动以及在低速区域可以稳定地进行精密的流量控制。

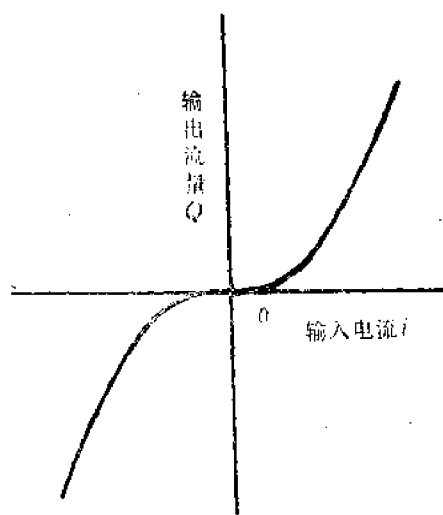


图7-3 KS阀的无负载流量特性

滑阀部采用正重叠是为了减少滑阀的泄漏，它可防止停止时的位置变动。同时，当阀口关闭时，即使同时使伺服系统变成开路也可维持，所以使其与给定值一致时可防止闭环控制中易于引起的极限环振荡。而输入电流与输出流量的关系取平方特性是在决定最大速度的额定电流时的流量增益可取大的值，相反将导致影响定位精度的零点附近的流量增益变小。因此最大速度很高而低速时，由于对输入电流的输出流量的分辨率高，所以可提高伺服刚性，可以实现高精度的微速控制。

伺服阀的结构都是以喷嘴挡板型为标准的，但是将来会出现结构更简单的比例电磁阀型或数字伺服阀。

除了伺服阀以外，在伺服环路内还有旁通阀与节流阀（或称调速阀），它们是在示教动作时使用的。旁通阀是用来把封闭在执行机构（油缸或油马达）两工作腔中的液压油连通，因此操作者可以毫不费力地握住机器人的手部示教实际的动作。此外在这样的示教方式中，也有在示教时将执行机构与传动机构脱开的方式。为了减少示教时的摩擦力，在Trallfa喷漆机器人中，油缸活塞是采取分离式结构的（哈尔滨工业大学研制的东方-I型喷漆机器人的油缸活塞也是分离式结构）。

节流阀是在以示教器进行动作的教示或修正时动作的，它是为了解决由于误操作而产生的高速运动的危险性、控制执行机构的动作速度为工作时的几分之一的一种安全装置。

5. 液压能源与工作油

机器人的供油压力一般多数是7MPa左右。有的通用型或特殊用途的为14MPa或更高些。使用低压的倾向是因为尺寸的要求并不严格没必要使用高压，另外使用低压元件

价格也便宜。

液压能源的结构，一般是以感应式电动机驱动定量泵，以溢流阀确定系统的压力，但是有时装设蓄压器以使油泵从经常负载下解放出来，达到节能的效果。

液压能源装在机器人本体内或者是另设在别处。喷漆机器人是在有爆炸危险的环境下进行作业，所以能源要放在作业现场外面。

工作油一般是使用矿物油系的液压油，但也有人正在试验使用难燃液压油。

三 控制与控制装置

1. 液压关节型机器人的控制

机器人的控制系统基本上是位置控制系统。因为液压系统中液压油是有压缩性的，所以即使伺服阀没有迟后，液压部分只是3阶以上的系统，所以开环放大系数不能太高。一个自由度伺服系统的方框图如图7-4所示。

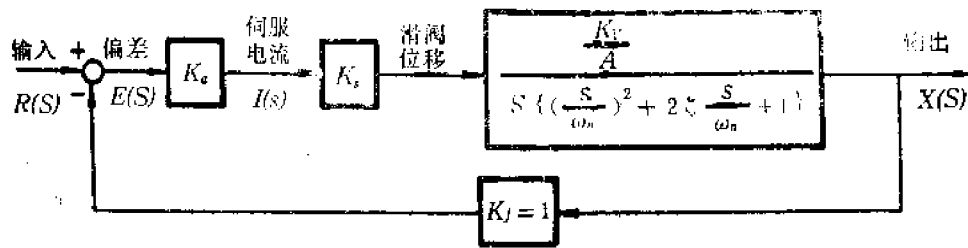


图7-4 电液伺服系统方框图

此系统的开环放大系数按劳斯稳定判据要小于 $2\zeta\omega_n$ 。由于电液伺服系统的阻尼比都比较小，所以对固有频率低的自由度难于保证规定的控制误差。特别是要求高速特性时，必须取大的 K_v 值时就更加困难。其解决办法就是加动压反馈补偿，动压反馈 (DPF) 补偿回路图如图7-5所示。其伺服阀电流以下式表示。

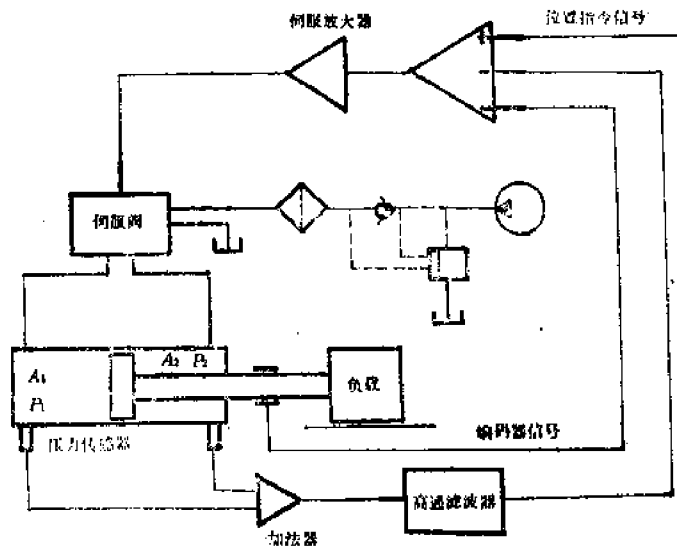


图7-5 动压反馈补偿回路

$$I(s) = f\{E(s)\} - K_p \cdot \frac{T_s}{1+T_s} \{A_1 P_1(s) - A_2 P_2(s)\}$$

式中 $f\{E(s)\}$ 是位置偏差需要的电流； K_p 是反馈增益； $T_s/(1+T_s)$ 是高通滤波器的传递函数； $\{A_1 P_1(s) - A_2 P_2(s)\}$ 是油缸的驱动力。

由上式可知动压反馈是起到使油缸两腔的压力变化平滑的作用，这对减少定位时的振动是有效的，特别是对于固有频率为 $5 \sim 10\text{Hz}$ 的系统尤为有效。

一般做为校正加 P 或 PI 串联校正，为了减少执行机构的摩擦经常使用颤振电流。

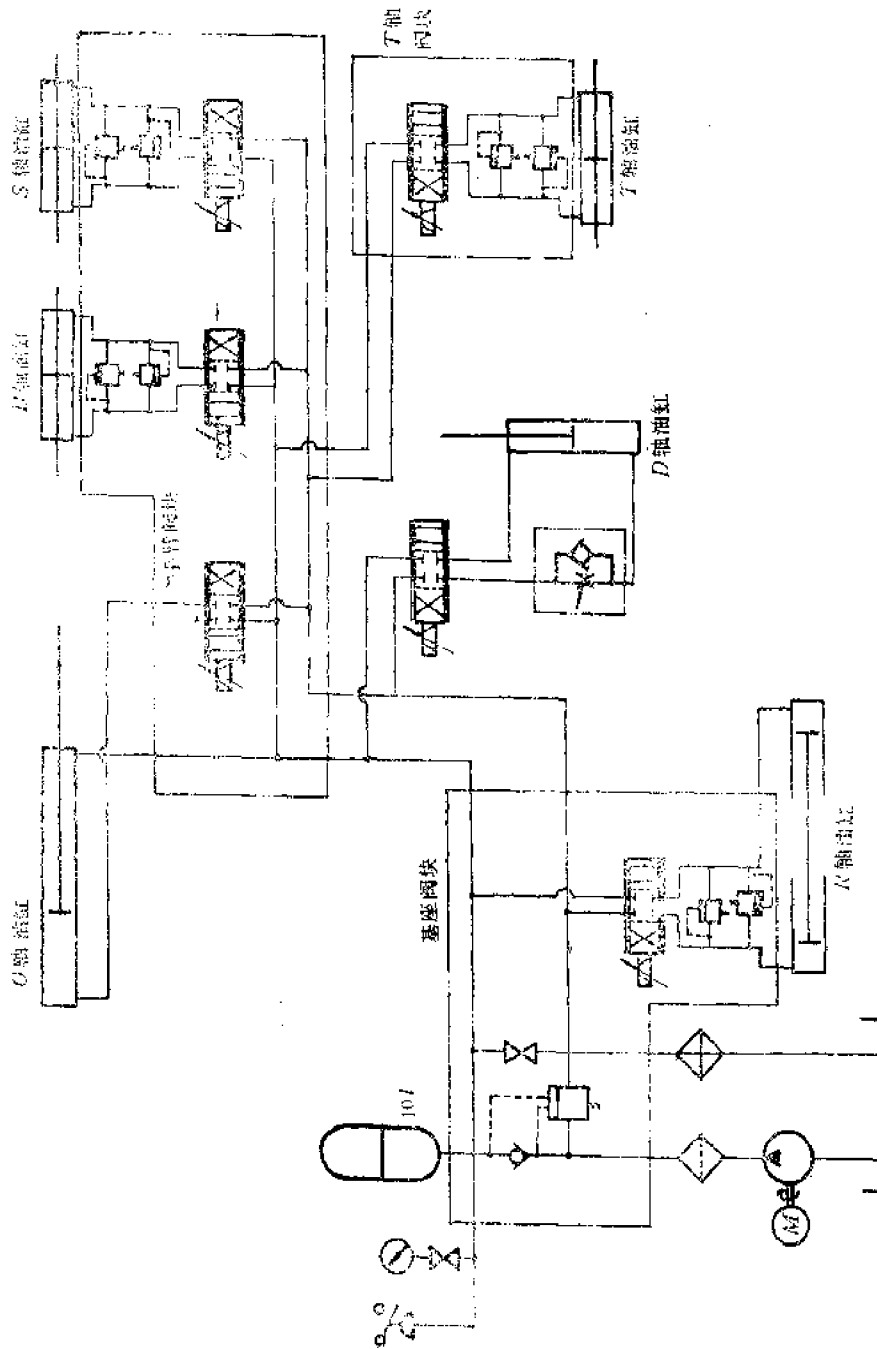


图 7-6 机器人液压回路图

图7-6是川崎Unimate的液压回路图。其能源是采用卸荷阀的节能回路，泵一般是在无负载下运转，当回路压力低于5 MPa时，泵开始带负载运转直到7 MPa时为止，这样系统压力保持在5~7 MPa内，可节省电力。如果对轨迹精度要求较高时，为防止供油压力引起伺服阀增益变化则采用溢流阀式定压油源。

关节型机器人控制中的最大问题是随着机器人的姿势不同而重力负载与转动惯量要产生很大变化。图7-7就是关节直接驱动机器人中姿势变化时，开环频率特性的例子。

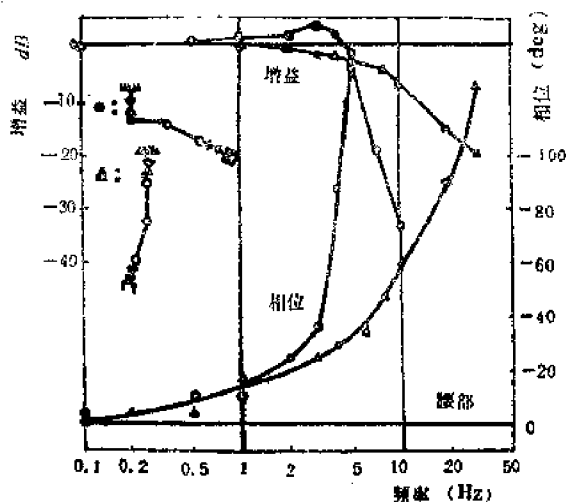


图7-7 姿势对频率特性的影响

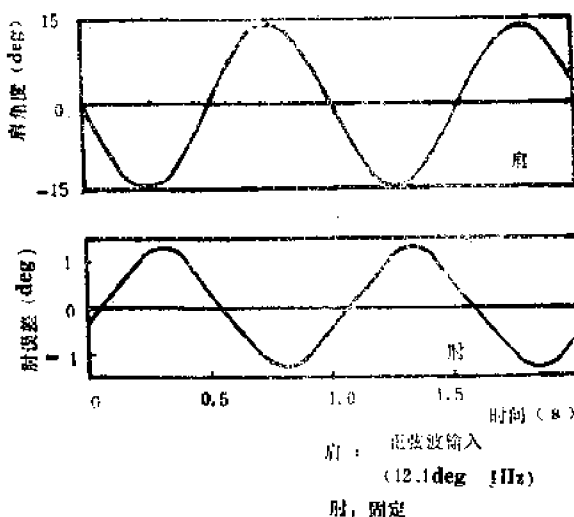


图7-8 关节间的交连运动

这时，即使不进行可变增益控制，至少应给定适当的增益进行状态反馈，以得到可忽略开环特性的良好闭环特性。另外利用姿势信号对伺服阀加入补偿以抵消重力矩的影响也是有效的。

关节型机器人的另一个问题是由于一个关节的前面与另一个关节相连接，这种结构容易在各关节间产生交连影响。图7-8就是川崎直接驱动关节型机器人的交连运动影响，一般情况这种交连影响没有多大问题，但是从提高精度来看要对此交连进行解耦。对此有人用压力反馈进行了研究。

另外，对录返型来说，利用机器人未来的目标值已知这一点，有人对加前馈补偿以提高机器人的轨迹精度进行了研究。

2. 控制装置

为了实现上述的控制必须进行复杂的运算。同时还要求控制装置能够有给机器人发出位置指令值的机能。

关节型机器人是以各关节角的组合确定位置，但是操作者直感地驱动各关节以取得希望的位置与姿势是非常困难的。因此操作者有必要把以直角坐标系指令变换成机器人关节坐标系的指令，使机器人动作。这种机能是在空间上指定2个点，并要求进行按此2点间规定轨迹移动时的插补作业。

做为进行这样的复杂运算且精度高的控制装置，目前是采用1台或几台微机的数字方式。由于伺服回路的补偿运算是通过计算机程序进行的，所以称为软件伺服系统。软

件伺服是离散控制，但是离散时间短，为数 ms 时，实际上就可看成为连续控制系统了。另外控制规划或改变增益都可通过改变程序来进行，所以是便宜、精度高和充分可靠的系统。

3. 检测器

伺服系统的信号检测器，一般检测位置是用编码器，此外还有电位计等。为了提高检测精度除了手腕部分外，都使用相当于15位左右分辨率的。编码器希望用绝对型的，但是受价格与尺寸的限制，所以增量型的用得较多。只是有时要想办法给定基准点。压力常用半导体型压力传感器。

另外为了检测各关节的动作界限，有用行程开关的，由于机器人不同，有时接触传感器与非接触传感器都用。

四 液压机器人的应用范围

一般工业用机器人可搬重量100N以下的是电动的，超过1000N的重量则使用液压的，在此中间是两者都有。从最近机器人的发展情况来看，由于电动方式的进步，液压机器人的使用范围有被电动方式侵占的趋势。但是如果充分发挥液压的高力矩惯性比等优点对存在问题采取相应对策后，在中量区域也可与电动式相竞争。另外液压机器人可在恶劣环境下作业，象水中或矿山作业中液压是有利的。此外在制造船的焊接、切割、除锈、喷涂及汽车工业中的铸锻造与装配，炼铁时更换耐火砖及桥梁的喷涂等作业中液压驱动机器人用的较多。

§ 7-2 油缸驱动关节式机器人电液伺服系统设计

一 液压机器人结构及控制的问题

机器人的特点是以其柔软性实现高度通用性的操作，因此对它必须以与以往的机械完全不同的概念进行设计，其不同的地方就是多自由度、多关节和结构的冗长性。这些不同的新问题随着机器人手臂结构形式（圆柱座标、极坐标和关节型等）与驱动装置的种类（气动、液压与电动等）的不同，其特点也不同，在此仅就电液伺服关节型机器人在系统设计中的具体问题加以简单地说明。

第一个问题是因手臂及驱动装置的结构原因形成伺服系统固有频率的降低以及阻尼特性的劣化。

关节型手臂，在关节处的转动惯量很大，所以机器人基础部的关节必须承受很大的惯性负载。为使转动惯量小，可尽量减小各手臂的重量，但是由于轻量化之后手臂的刚性降低了。惯性负载大和柔性结构，无疑是降低结构体的固有频率和阻尼效果的，这就是手臂伺服系统特性劣化的原因。

关节型机器人的手臂是串联结构，所以伺服阀与执行机构的布置是个难题。在一般的液压伺服系统设计时，伺服阀与油缸是直接连接的，在两者的接合部是不允许有柔性存在的，但是如果把伺服阀也装的手臂上将使手臂的重量和关节的转动惯量急剧地增大。如果把与伺服阀直接连接的驱动部分放在机器人的基础上通过钢丝绳等传递动力时，由

于钢丝的弹性以及传动机构的间隙等也是对机器人特性不利的。考虑到各种元件的重量分配和结构刚性之后，驱动部分的合理结构是把执行元件(油缸或油马达)放在手臂上，把伺服阀放在底座上，两者之间再以挠性连接。由于大的惯性负载和传动的柔性(可压缩性)使系统的固有频率和阻尼比下降，所以必须进行适当的特性补偿。

一般考虑到油的压缩性以后液压驱动系统的特性是3阶的系统，这就意味着与2阶系统特性相差很远，对于柔性影响显著的液压伺服系统来说，加动压反馈补偿对改善系统特性是有效的，但是目前还没有见到普遍适用的设计方法。

第二个问题是多自由度手臂间的运动交连耦合问题。

特别是机构或动力传动部分的柔性更加助长交连耦合的效果，其结果使系统变成了复合振动系统。

多变数控制系统的解耦是最近控制理论的主要问题之一。在用状态描述的控制理论中，解耦可以用系数矩阵的对角化加以简单的处理，但是它并没有考虑具体实现的可能性，这种方法可以说还没有得到真正的解决。实现了多变量系统设计的是Rosenbrock等的研究，它是一种把频率特性法扩展到多变量系统的方法。

这种方法是把各元件的特性用传递函数来描述，把这些传递函数当成元素用传递矩阵表现整个系统的特性。在设计系统时，它是把这个矩阵的拟对角化、向量轨迹扩展到多变量系统，用这样的奈魁斯特数组进行设计的一种方法，此研究结果提出了明确的多变量系统设计的方法。这种频率特性的扩展法对多自由度液压伺服系统设计也是可用的，传递矩阵拟似对角化的想法也给解耦以适切的启发。但是为了实现这一补偿，必须考虑诸如检测的简易化及运算的实现可能性等这些液压控制特有的问题。

第三个问题是由于机器人的结构而形成的非线性问题。关节处悬臂机构的惯性力矩以及由重力而产生的力矩，不仅随着机器人的姿势变化而变化，而且还由于手臂是运动的，还要产生离心力、哥氏力等动态的非线性力。其中的动态非线性力有时是可以忽略的，但是对于惯性力矩和重力项的变化是必须采取措施加以解决的。

解决的办法之一，是根据手臂运动方程式中的惯性项及重力项的变化来调节控制装置参数的方法。参数的计算可在检测出旋转关节角之后由计算机进行，但是，在手臂的高速运动控制中直接反馈是使用连续量控制回路，必须是根据计算机的输出改变连续量控制回路的增益。

另外的解决办法是，由于这些非线性特性的影响其结果是通过油缸负载而表现出来的，所以可以采用以油缸压力消除这种负载变化影响的回路。这是一种负载无反应型伺服系统的方法，这种方法不仅使多自由度系统中交连影响消除，而且可使伺服系统由3阶变成2阶系统。

二 液压关节型机器人控制系统的特性

关节型机器人，一般是用于安装、焊接及喷漆等比较复杂的作业中，一般有5个或6个关节(自由度)。从各关节所承受的负载和精度要求来看，驱动机构中问题最大的是基础上的关节。为了简单起见下面介绍垂直臂与水平臂两关节的伺服系统设计问题。

1. 手臂机构的运动方程式

图7-9是机器人垂直臂与水平臂的机构原理图，其两臂都是以油缸驱动的，两油缸用的伺服阀都装在基础上，中间以软管相连接，下面对此液压机器人进行分析，推导出用于设计控制系统的传递函数。

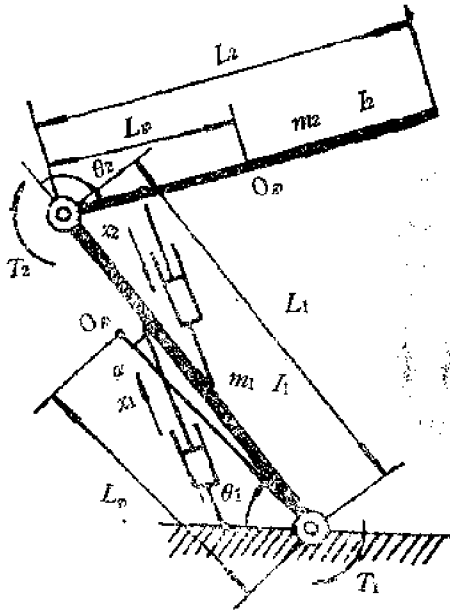


图7-9 手臂机构图

图中的 O_{q1} 、 O_{q2} 分别为臂的重心位置， O_{q2} 基本在臂的轴线上，而 O_{q1} 由于驱动机构的结构关系，它处于臂的外部，分析时所用符号如下。

θ_1 、 θ_2 ：在图示方向上所测得的关节角，

X_1 、 X_2 ：活塞位移，

l_1 、 l_2 ：臂长，

m_1 、 m_2 ：臂的质量。

I_1 、 I_2 ：绕各重心的转动惯量，

l_{q1} 、 l_{q2} ：各关节到重心的距离，

α ：表示 O_{q1} 位置的角度。

手臂机构的运动方程式可由拉格朗日方程导出。由图7-9可得，动臂机构的动能 T 与位能 U 可用下式表示。

$$T = \frac{1}{2} \{ I_1 + I_2 + m_1 l_{q1}^2 + m_2 (l_1^2 + l_{q2}^2 + 2l_1 l_{q2} \cos \theta_2) \} \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} (I_2 + m_2 l_{q2}^2) \dot{\theta}_2^2 + \{ m_2 (l_{q2}^2 + l_1 l_{q2} \cos \theta_2) + I_2 \} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \quad (7-1)$$

$$U = g [m_1 l_{q1} \sin(\theta_1 - \alpha) + m_2 \{ l_1 \sin \theta_1 + l_{q2} \sin(\theta_1 + \theta_2) \}] \quad (7-2)$$

将上面2式代入拉格朗日方程式(7-3)中。

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_i} &= T_i, \quad (i=1, 2) \\ L &= T - U \end{aligned} \right\} \quad (7-3)$$

式中下标 i 是手臂的标号，此处 $i=2$ 。

将式(7-1)、(7-2)代入式(7-3)后可得如下2个关于力矩的公式。

$$\left. \begin{aligned} T_1 &= (a_1 + 2a_3 \cos \theta_2) \ddot{\theta}_1 + (a_2 + a_3 \cos \theta_2) \ddot{\theta}_2 - a_3 (2\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \dot{\theta}_2 \sin \theta_2 \\ &\quad + a_4 \cos(\theta_1 + \alpha) + a_5 \cos \theta_1 + a_6 \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{aligned} \right\} \quad (7-4)$$

$$T_2 = (a_2 + a_3 \cos \theta_2) \ddot{\theta}_1 + a_2 \ddot{\theta}_2 + a_3 \dot{\theta}_1^2 \sin \theta_2 + a_6 \cos(\theta_1 + \theta_2)$$

式中 a_j ($j=1, 2, \dots, 6$) 是手臂各元素的函数。

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= I_1 + I_2 + m_1 l_{g1}^2 + m_2 (l_1^2 + l_{g2}^2), \\ a_2 &= I_2 + m_2 l_{g2}^2, \quad a_3 = m_2 l_1 l_{g2}, \\ a_4 &= m_1 l_{g1} g, \quad a_5 = m_2 l_1 g, \quad a_6 = m_2 l_{g2} g \end{aligned} \right\} \quad (7-5)$$

式(7-4)是非线性微分方程式,并且在同一公式中有 θ_1 与 θ_2 存在,这说明两臂间存在着运动的干扰(交连耦合)。为了简化系统的设计可将上式进行线性化处理,以求得在某一状态附近的线性近似公式。用“ \wedge ”表示某一标准状态,用“ Δ ”表示微小变化量,则

$$\theta_i = \hat{\theta}_i + \Delta\theta_i, \quad T_i = \hat{T}_i + \Delta T_i \quad (7-6)$$

将上式代入式(7-4)中,并忽略2阶以上的微小项及数值上的微小项之后得到如下的线性方程式。

$$\left. \begin{aligned} h_{11} \Delta\ddot{\theta}_1 + h_{12} \Delta\ddot{\theta}_2 &= \Delta T_1 \\ h_{21} \Delta\ddot{\theta}_1 + h_{22} \Delta\ddot{\theta}_2 &= \Delta T_2 \end{aligned} \right\} \quad (7-7)$$

式中 $h_{11} = a_1 + 2a_3 \cos \hat{\theta}_2$, $h_{12} = a_2 + a_3 \cos \hat{\theta}_2$

$$h_{21} = a_2 + a_3 \cos \hat{\theta}_2, \quad h_{22} = a_2$$

2. 液压驱动部分的基础公式

图7-10是液压驱动部分的简图和符号,此处 i 是第 i 号臂液压驱动部分的意义,其各符号如下。

q_{i1} 、 q_{i2} : 伺服阀的流出流入的流量;

p_{i1} 、 p_{i2} : 油缸两腔的压力;

A_{i1} 、 A_{i2} : 油缸两腔的有效作用面积;

C_{i1} 、 C_{i2} : 柔性系数;

x_i : 油缸的输出位移;

u_i : 伺服阀的输入(滑阀按箭头方向运动)。

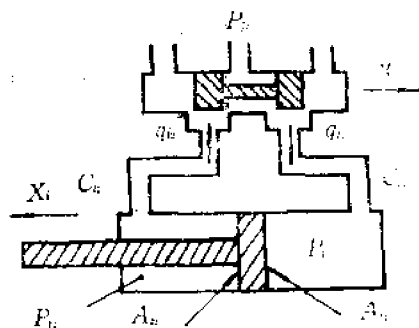


图7-10 液压驱动部分简图

如忽略伺服阀的动作迟后,则其特性如下。

$$\left. \begin{aligned} q_{i1} &= K_{u_i} u_i - K_{p_i} p_{i1} \\ q_{i2} &= K_{u_i} u_i + K_{p_i} p_{i2} \end{aligned} \right\} \quad (7-8)$$

式中 K_{u_i} 、 K_{p_i} 是表示伺服阀的流量增益与压力感度常数。

对油缸的各腔有如下的流动连续式:

$$\left. \begin{aligned} q_{i1} &= A_{i1} \dot{x}_i + C_{i1} \dot{p}_{i1} \\ q_{i2} &= A_{i2} \dot{x}_i - C_{i2} \dot{p}_{i2} \end{aligned} \right\} \quad (7-9)$$

3. 关节驱动力矩

考虑活塞位移与手臂旋转间的几何关系后，由油缸的有效输出力就可求出由活塞产生的关节驱动力矩。

首先在 x_i 与 θ_i 间存在 $x_i = g_i(\theta_i)$ 的非线性的几何关系，但是某一状态下经过线性化后，可用下式表示此几何关系。

$$\Delta x_i = g_i(\hat{\theta}_i) \Delta \theta_i \quad (7-10)$$

式中 $g_i(\hat{\theta}_i)$ 是表示在某一标准状态 $\hat{\theta}_i$ 下的常数。利用此关系式就可导出油缸的有效输出力 f_{e_i} 与关节力矩 T_i 间的关系。即由假想功或虚功原理可得：

$$T_i \Delta \theta_i = f_{e_i} \Delta x_i$$

由此可得

$$T_i = g_i(\hat{\theta}_i) f_{e_i} \quad (7-11)$$

另外，在油缸中存在有因密封等产生的摩擦，考虑这些摩擦力之后，则 f_{e_i} 为

$$\left. \begin{aligned} f_{e_i} &= f_{a_i} - d_i \dot{x}_i - f_{c_i} \\ f_{c_i} &= A_{i1} p_{i1} - A_{i2} p_{i2} \end{aligned} \right\} \quad (7-12)$$

式中的 d_i 、 f_{c_i} 是油缸中的粘性摩擦力和静摩擦力， f_{a_i} 是由作用在活塞上的油压力产生的总操作力。由式(7-11)、(7-12)得：

$$T_i = g_i(\hat{\theta}_i) (f_{a_i} - d_i \dot{x}_i - f_{c_i}) \quad (7-13)$$

4. 传递函数

由伺服阀的输入到关节角的传递函数，可由式(7-7)、(7-8)、(7-9)、(7-10)、(7-12)及(7-13)导出。因传递函数是在某一平衡状态附近按微小变化导出的，以后可省去微小量符号“ Δ ”认为所有变量都是在此状态附近取的微小量。首先由式(7-7)、(7-10)及(7-13)可得下式：

$$\mathbf{H}(s)\theta(s) = \mathbf{F}_e(s) \quad (7-14)$$

中

$$\mathbf{H}(s) = \begin{bmatrix} h_{11}s^2 + \hat{g}_1^2 d_1 s & h_{12}s^2 \\ h_{21}s^2 & h_{22}s^2 + \hat{g}_2^2 d_2 s \end{bmatrix}$$

$$\theta(s) = \begin{bmatrix} \theta_1(s) \\ \theta_2(s) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{F}_e(s) = \begin{bmatrix} \hat{g}_1 f_{e1}(s) \\ \hat{g}_2 f_{e2}(s) \end{bmatrix}$$

式中是以 \hat{g}_i 代替 $g_i(\hat{\theta}_i)$ 的。

而 $\mathbf{F}_e(s)$ 的各元素由式(7-8)、(7-9)、(7-10)及(7-12)得

$$f_{e_i} = \frac{1}{C_{i1}s + K_{p1}} [K_{v1}(A_{i1} + A_{i2})u_i(s) - (A_{i1}^2 + A_{i2}^2)\hat{g}_i s \theta_i(s)] \quad (7-15)$$

式中取 $C_{i1} = C_{i2} = C_i$ 。由此 $\mathbf{F}_e(s)$ 可用下式表示

$$\mathbf{F}_e(s) = \mathbf{A}(s)\mathbf{U}(s) - \mathbf{B}(s)\theta(s) \quad (7-16)$$

式中
$$\mathbf{U}(s) = \begin{bmatrix} u_1(s) \\ u_2(s) \end{bmatrix}, \quad A(s) = \text{diag} \left[\frac{K_{*i} \hat{g}_i (A_{i1} + A_{i2})}{C_i s + K_{*i}} \right],$$

$$B(s) = \text{diag} \left[\frac{\hat{g}_i^2 (A_{i1}^2 + A_{i2}^2) s}{C_i s + K_{*i}} \right]$$

如将式 (7-16) 代入式 (7-14), 则得下式:

$$\theta(s) = [H(s) + B(s)]^{-1} A(s) \mathbf{U}(s) \quad (7-17)$$

如将一个手臂固定后单一手臂的传递函数是式 (7-17) 矩阵的对角线元素以下式给出。

$$G_i = \frac{\theta_i(s)}{u_i(s)} = \frac{\hat{g}_i (A_{i1} + A_{i2}) K_{*i}}{s [h_{*i} C_i s^2 + (C_i \hat{g}_i d_i + h_{*i} K_{*i}) s + \hat{g}_i^2 \{d_i K_{*i} + (A_{i1}^2 + A_{i2}^2)\}]} \quad (7-18)$$

三 单一自由度伺服系统的设计

虽然电液伺服系统在工业机器人中应用甚广, 但是考虑机器人的特有问题而设计电液伺服系统的方法到现在为止还不很成熟, 并且公开发表的也相当少见。在此仅就带惯性负载的机器人伺服系统介绍日本京都大学花房提出的油缸驱动电液伺服系统的设计方法以资参考。

1. 3阶系统的特性

液压伺服控制机器人手臂的开环传递函数一般如式 (7-18) 所示, 至少可用3阶系统模型来描述。在此首先对3阶系统的设计方法简单讨论之后再介绍在一个手臂(自由度)固定的情况下, 对另一个手臂进行补偿的方法。

一般可将只有惯性负载的3阶电液伺服系统的开环传递函数写成如下形式:

$$G(s) = \frac{a_3}{s^3 + a_1 s^2 + a_2 s} \quad (7-19)$$

式中 a_3 的因次是 s^{-1} , 如引入无因次化时间 $\tau = \sqrt[3]{a_3} t$, 则式 (7-19) 可写成如下形式:

$$G_*(s) = \frac{1}{s_1^3 + \alpha s_1^2 + \beta s_1} \quad (7-20)$$

$$\alpha = a_1 / \sqrt[3]{a_3}, \quad \beta = a_2 / \sqrt[3]{a_3}$$

式中 s_1 是对无因次时间 τ 的拉氏变换。系数 α 、 β 决定3阶系统的响应特性, 而 a_3 则决定时间比例尺。按这些系数进行设计的方法如下所述。

2. 频率的响应法

频率特性的性能指标是以增益裕量与相位裕量表示的。在图 7-11 的 α - β 曲线中增益裕量常数与相位裕量常数分别以实线与虚线表示。一般对伺服系统的期望特性其各常数如下:

$$q_m^3 = 12 \sim 16 \text{dB}, \theta_m = 40^\circ \sim 60^\circ$$

式中 q_m 、 θ_m 分别是增益裕量与相位裕量。

由图 7-11 可知，与式 (7-20) 相等的 α 、 β 的数值如下：

$$\alpha \approx 2, \beta \approx 3$$

对式 (7-19) 加以直接反馈后，其闭环传递函数为

$$\frac{a_3}{s^3 + a_1 s^2 + a_2 s + a_3} = \frac{\sigma \omega_n^2}{(s + \sigma)(s^2 + 2\xi \omega_n s + \omega_n^2)} \quad (7-21)$$

式中 σ 、 ω_n 是按式 (7-21) 进行无因次化的。

$$\sigma' = \sigma / \sqrt{a_3}, \omega_n' = \omega_n / \sqrt{a_3} \quad (7-22)$$

因此 α 、 β 与 σ' 、 ω_n' 、 ξ 的关系为：

$$\alpha = 2\xi \omega_n' + 1/\omega_n'^2, \beta = \omega_n'^2 + 2\xi/\omega_n' \quad (7-23)$$

$$\sigma' \alpha + (\sigma'^2 - 1/\sigma') = -\beta$$

由 α 、 β 确定 σ' 、 ξ 、 ω_n' 则响应特性就可确定了。

另外一种设计方法，是利用 DP (动态规划)、MP (极大值原理) 等的最佳控制理论的方法。对单位阶跃输入其评价函数如下：

$$J = \int_0^{\infty} (r x^2 + u^2) dt \quad (7-24)$$

式中 u 、 x 分别表示图 7-12 所示系统的输入与输出， r 是加权系数。

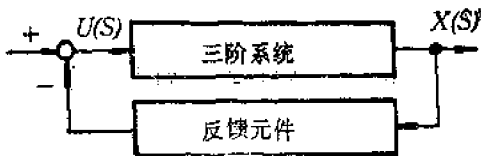


图 7-12 3阶系统的最佳控制

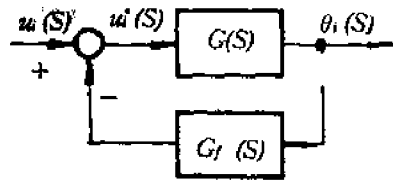


图 7-13 反馈补偿原理图

做为一种特例，当系统的前向通道特性可用 k/s^3 表示时，可得到最佳特性的反馈元件与 $\alpha = \beta = 2$ 相对应。

当前向通道特性不同时，当然最佳条件也就与 $\alpha = \beta = 2$ 的条件不符合了。但是若使式 (7-24) 中的 r 增大时，最佳条件就接近于 $\alpha = \beta = 2$ 。因此， $\alpha = \beta = 2$ 的条件，是 3 阶系统设计的合理目标。

3. 对 3 阶系统的反馈补偿

图 3-13 是反馈补偿原理图。

用 α - β 曲线图讨论图 7-13 所示的反馈补偿效果。假定通过反馈补偿后系统的参数 a_1 、 a_2 、 a_3 、 α 、 β 变为 a_1^* 、 a_2^* 、 a_3^* 、 α^* 、 β^* 。

· 增加速度反馈 $G_f(s) = k_v s$ 时, 只有 a_2 、 β 增加。

$$\left. \begin{aligned} a_1^* &= a_1, \quad a_2^* = a_2 + a_3 k_v, \quad a_3^* = a_3, \quad \alpha^* = \alpha \\ \beta^* &= \beta + (a_3 k_v / \sqrt{a_3^2}) \end{aligned} \right\} \quad (7-25)$$

· 当加入加速度反馈 $G_f(s) = k_a s^2$ 时, 只有 a_1 与 α 增加。

$$\left. \begin{aligned} a_1^* &= a_1 + a_3 k_a, \quad a_2^* = a_2, \quad a_3^* = a_3, \\ \alpha^* &= \alpha + (a_3 k_a / \sqrt{a_3^2}), \quad \beta^* = \beta \end{aligned} \right\} \quad (7-26)$$

在原来的系统中, 当 β 远大于 α 时, 由图 7-11 可知, 加速度反馈使增益裕量 g_m 与相位裕量 θ_m 及 ξ 增加, 则系统的稳定性及阻尼特性得到了改善。另外, 速度反馈对上述特性基本上是无影响的。如果相反, α 比 β 大很多时, 反馈的效果也倒过来了。如果增大图 7-13 所示系统的开环增益, 则 a_3 增加, 使响应时间缩短。但是由式 (7-20) 可知, 减小 α 、 β 值则接近不稳定区域。

4. 压力反馈补偿

下面介绍驱动单一自由度电液伺服系统的补偿问题。

当第 2 关节 (水平臂关节) 固定在 $\theta_2 = 45^\circ$ 时, 在 $\theta_1 = 90^\circ$ 的附近, 表示第 1 关节微小运动的 α 、 β 值如图 7-11 中所标的 A 点所示。此点的 β 值远远大于 α 值, 即 $\beta \gg \alpha$, 这时加速度反馈最有效。压力反馈基本上与加速度反馈具有相同的效果。但是压力反馈对于静载荷的变化产生稳态偏差, 这是压力反馈的缺点。因此在反馈通道内要装设低频切断滤波器。

具体地说, 就是检测出油缸两侧的压力 p_{11} 、 p_{21} , 用式 (7-12) 进行计算后求出 f_{o1} , 把伺服阀的输入 u_i 变成 u_i^* 后组成反馈系统。

$$u_i^* = u_i - \frac{k_{p1i} T_{f1i} s}{1 + T_{f1i} s} f_{o1} \quad (7-27)$$

式中 k_{p1i} 、 T_{f1i} 分别为压力反馈回路的增益常数和低频切断滤波器的系数。

活塞的驱动力, 只要把式 (7-15) 中的 u_i 以 u_i^* 代替即可求得。最后, 将式 (7-18) 中的 k_{p1i} 换成下式的 k_{p1i}^* , 就可得出压力反馈的效果。

$$k_{p1i}^* = k_{p1i} + k_{p1i} \frac{(A_{i1} + A_{i2}) k_{v1} T_{f1i} s}{1 + T_{f1i} s} \quad (7-28)$$

随着频率的不同, 压力反馈的效果也变化。增益常数 k_{p1i} 应该按照在剪切频率附近得到适当的 α 、 β 的条件加以确定。

由式 (7-18) 可知, k_{p1i} 出现在 s^2 、 s 两项的系数中。因此可以说它与加入速度与速度两个反馈是等价的, 但是当粘性摩擦系数 d_i 小, 而且 $k_{v1} k_{p1i} \ll \hat{g}_i (A_{i1}^2 + A_{i2}^2)$ 时, 压力反馈与加速度反馈基本上是同等的, 图 7-11 中的 A 点, 由于加入压力反馈向单个箭头方向移动。然后, 当全体的增益增加时, A 点向双箭头方向移动, 接近 $\alpha = 2$, $\beta = 3$ 。

5. 解耦补偿

由于关节式机器人多自由度手臂的运动是相互干扰的，为了实现高精度的控制必须采取消除干扰的措施，即解耦补偿。在此介绍对单一自由度经过压力补偿后的消除干扰的方法。

加入压力补偿之后，液压驱动部分的特性由式 (7-16) 变成了下式：

$$F_a(s) = A^*(s)U(s) - B^*(s)\theta(s) \quad (7-29)$$

根据表示手臂特性的公式 (7-14) 和 (7-29)，机器人控制系统前向通道的特性可用图7-14(a)的方框图表示。在此图中 $H(s)$ 包含非对角项，它将引起干扰。

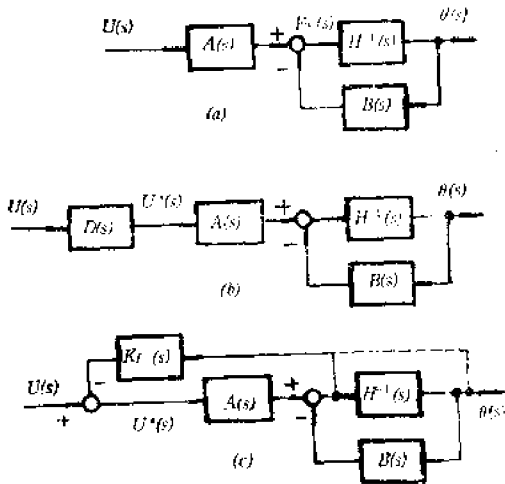


图7-14 对干扰的补偿

消除干扰的措施有两个，一个是如图 (b) 加前置放大器的方法，另一个如图 (c) 加反馈补偿的方法，用前置放大器的方法，为了消除干扰预先把输入信号处理后作为伺服阀的输入；反馈补偿是通过输出反馈使系统模型结构变化的一种方法。在反馈补偿法中，一般是按图示虚线将系统的最终输出 $\theta(s)$ 反馈，但是对液压伺服来说，如按实线所示将油缸操作力 $F_a(s)$ 反馈，这样可使补偿回路的阶数降低并便于实现。上述的方法，其补偿的原理都是把图 7-14 的传递矩阵进行对角化处理，其方法基本上是类似的，因此只介绍图 (c) 表示的操作力反馈（与压力反馈相同）的补偿法。

通过消除干扰的反馈补偿，伺服阀的输入由 U 变成了 U^* 。

$$U^*(s) = U(s) - K_f(s)F_a(s) \quad (7-30)$$

式中 $K_f(s)$ 是补偿回路的传递矩阵。将 $U^*(s)$ 代入式 (7-29) 的 $U(s)$ 中，可求出此时的操作力如下：

$$F_a(s) = [I + A^*(s)K_f(s)]^{-1} [A^*(s)U(s) - B^*(s)\theta(s)] \quad (7-31)$$

式中 I 是单位矩阵。如将式 (7-31) 代入式 (7-14) 则得与式 (7-17) 相等的系统方程式如下：

$$\theta(s) = [H(s) + A^*(s)K_f(s)H(s) + B^*(s)]^{-1} A^*(s)U(s) \quad (7-32)$$

因此，消除干扰就是通过适当地选择 $K_f(s)$ ，使该式的 $U(s)$ 的系数对角线化。这时，对角化的系数矩阵，在理论上是可以任意选择的，但是考虑到使单一手臂的特性不变以及实现控制回路的可能性，可选择与公式 (7-17) 相类似的下面公式。

$$\theta(s) = [H_d(s) + B^*(s)]^{-1} A^*(s)U(s) \quad (7-33)$$

式中 $H_d(s)$ 是只有 $H(s)$ 的对角线元素的对角矩阵。令式 (7-32) 与式 (7-33) 相等，则可按下式求得 $K_f(s)$ 。

$$K_f(s) = A^{*-1}(s)[H_d(s) - H(s)]H^{-1}(s) \quad (7-34)$$

通过对上式的计算可知, $K_f(s)$ 的元素具有以下阶次。

$$k_{f, j} = \frac{b_{f0}s^3 + b_{f1}s^2 + b_{f2}s + b_{f3}}{a_{f0}s^2 + a_{f1}s + a_{f2}} = C_{f0}s + C_{f1} + \frac{C_{f2}s + C_{f3}}{a_{f0}s^2 + a_{f1}s + a_{f2}} \quad (7-35)$$

通过对实际动作状态的计算可知, 式(7-35)的最后一项可以忽略, 在反馈补偿中采用下式就足够了。

$$k_{f, j} = C_{f0}s + C_{f1} \quad (7-36)$$

补偿的效果通过实验可看得很清楚。图7-15是该机器人的阶跃响应实验结果, 图(a)是对第一手臂加阶跃输入, 图(b)是对第二手臂加阶跃输入的结果。图上侧是无补偿的, 下侧是加补偿的情况。通过补偿不仅可以抑制未加输入侧的响应, 同时也改善了加输入侧自身的响应, 这一点从实验结果可看得很清楚。

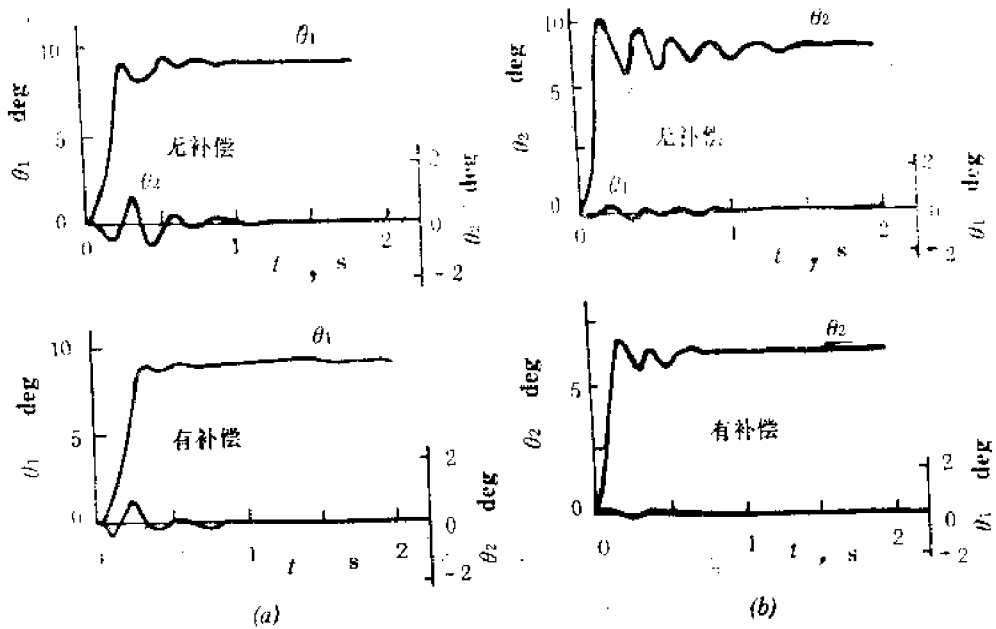


图7-15 补偿的实验结果

四 提高液压机器人连续轨迹控制精度的一种方法

近几年机器人的使用范围正在扩大, 其控制方式不只是点到点(PTP)控制, 而且也开始采用连续(CP)控制轨迹。在此介绍的方法是用简单的跟踪方式以改善常见的连续轨迹以实现高速高精度的连续轨迹控制。

一般工业机器人为多自由度, 其各轴均独立构成伺服系统, 且多数是示教再现型的。利用这样的机器人进行高速度轨迹控制时, 存在的问题是: ①在轨迹的急变部分, 作业工具端点相对目标轨迹要产生超调; ②在作业端点的轨迹中要产生由各轴伺服系统的跟踪误差合成的轨迹误差。

对于示教再现型机器人来说, 由于目标轨迹已通过示教存储在记忆装置中了, 所以可利用目标值的未来值, 把预见性控制理论的成果用于机器人的连续轨迹控制。在此只讨论轨迹跟踪速度一定时的预见性控制, 如实现可变速预见控制时其提高精度的效果将

会更加显著。

1. 机器人的模型

此方法所用的机器人其特点如下。

① 各轴的结构如图7-16所示，是6自由度极坐标型式，臂部3自由度（R、D、C）与手部3自由度（B、S、T）。

② 各自由度由独立的电液伺服系统构成。

③ 为示教再现型。

R轴的电液伺服系统模型如图7-17所示。

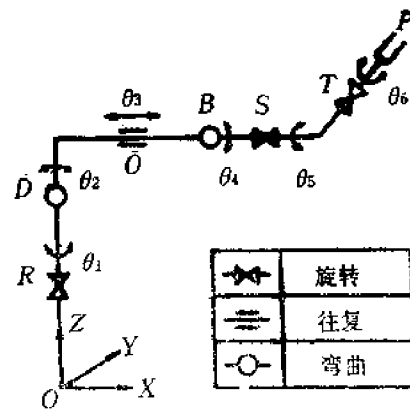


图7-16 机器人的结构

示。

臂部3自由度相互干扰的主要力（力矩）如表7-2所示。

表7-2 R、O、D三自由度的负载力矩（力）及转动惯量

R 轴	T_R	哥 氏 力	$2m\dot{\theta}_1\dot{\theta}_3\dot{\theta}_3\cos^2\theta_2$
			$-I_3^*\ddot{\theta}_1\dot{\theta}_2\sin\theta_2$
	I_R	转 动 惯 量	$I_3\cos^2\theta_2+I_0$
O 轴	F_0	离 心 力	$-m(\dot{\theta}_2^2\theta_3+\ddot{\theta}_2^2\theta_3\cos^2\theta_2)$
		重 力	$mg\sin\theta_2$
		惯 性 力	$-ml_1\ddot{\theta}_2$
	M_0	惯 性 质 量	m
D 轴	T_D	哥 氏 力	$2m\dot{\theta}_2\dot{\theta}_3\dot{\theta}_3$
		离 心 力	$\frac{1}{2}I_3\dot{\theta}_1^2\sin 2\theta_2$
		重 力	$mg\theta_3\cos\theta_2$
		惯 性 力	$-ml_1\ddot{\theta}_3$
	I_D	转 动 惯 量	$m(\theta_3^2+l_1^2)+I_2+I_4+Ml_2^2$

$$(I_3=m(\theta_3^2+l_1^2)+I_1+I_2)$$

手腕部3自由度相互干扰较小，对其它自由度的影响可以忽略。

主要符号如下。

k'_v ： 伺服阀流量增益 cm^2/s

$q_1、q_2$ ： 伺服阀的输出流量 cm^3/s

- β : 油的体积弹性系数Pa
 V_m : 油缸内油的体积 cm^3
 r_d : R轴角度-油缸位移变换系数 cm/rad
 A_1, A_2 : 油缸受压面积 cm^2
 P_s : 供油压力Pa
 P_1, P_2 : 油缸内压力Pa
 T_f : 摩擦力矩 $\text{N}\cdot\text{cm}$
 g : 重力加速度 cm/s^2
 m : 手臂部质量kg
 M : 悬臂部质量kg
 I_1, I_2 : 手臂部转动惯量 $\text{kg}\cdot\text{M}^2$
 I_3, I_4 : 悬臂部转动惯量 $\text{kg}\cdot\text{M}^2$
 I_R, I_D : R、D轴转动惯量 $\text{kg}\cdot\text{M}^2$

2. 使用目标值的未来值方法

在进行工业机器人的连续轨迹控制时，不仅利用现时点的目标值而且还利用未来的目标值使跟踪轨迹的性能得到提高。象这种有预见性控制动作的跟踪系统设计方法是使用目标值未来值的理论。在此是把上述理论用在线性近似的工业机器人中，进行机器人控制系统设计的。然后通过对上述的非线性模型进行模拟对一个自由度电液伺服系统进行实验以验证此方法的有效性。

(1) 控制系统的设计

设计时所用的线性近似模型是将图7-17所示系统进行线性化，作为单输入单输出的线性定常系统可以用公式(7-37)与公式(7-38)来表示。

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \dot{x}_3(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\omega_n^2 & -2\zeta\omega_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ b_0 \end{bmatrix} u(t) \quad (7-37)$$

$$y(t) = (1 \quad 0 \quad 0) \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \end{bmatrix} \quad (7-38)$$

式中

$$b_0 = \frac{2\beta K_s A_c T_d^2}{V_m I_R} \quad (7-39)$$

$$\zeta = \frac{K_f}{A_c r_d} \sqrt{\frac{\beta I_R}{2V_m}} \quad (7-40)$$

$$\omega_n = A_c r_d \sqrt{\frac{2\beta}{V_m I_R}} \quad (7-41)$$

- $x_1(t)$: 动作轴的位置rad
- $x_2(t)$: 动作轴的速度rad/s
- $x_3(t)$: 动作轴的加速度rad/s
- $y(t)$: 动作轴的位置输出rad
- $u(t)$: 伺服阀的输入电流mA
- ξ : 2阶振动环节的阻尼比
- ω_n : 2阶振动环节的固有频率rad/s
- A_c : 活塞受压面积 cm^2
- k_f : 伺服阀流量增益 $\text{cm}^3/\text{s}\cdot\text{mA}$
- k_p : 随负载压力增加伺服阀输出流量的减少率 $\text{cm}^3/\text{Pa}\cdot\text{s}$

线性模型的方块图如图7-18的虚线所示。此处的连续轨迹控制是各轴分别独立地进行伺服控制，控制系统的设计是以各轴的位置为时间函数而跟踪目标值的伺服系统。

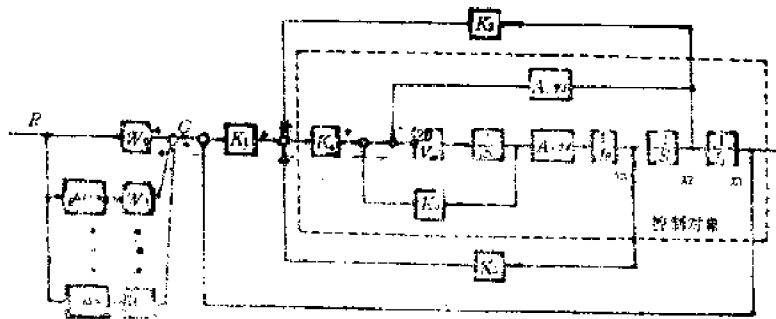


图7-18 伺服系统方块图

用上述理论，如果将选定后的目标函数用于工业机器人的连续轨迹控制时，则如式(7-42)与(7-43)所示。

$$J(t) = \frac{1}{2} \rho e(t+t_f)^2 + \frac{1}{2} \int_t^{t+t_f} \{e(\tau)^2 + \lambda u(\tau)^2\} d\tau \quad (7-42)$$

$$e(t) = r(t) - x_1(t) \quad (7-43)$$

式中 ρ, λ 为常数。

目标函数采用由现在时刻 t 到一定时刻 $(t+t_f)$ 之前的位置偏差 $e(\tau)$ ($t \leq \tau \leq t+t_f$)，以及伺服阀电流 $u(\tau)$ 。

使目标函数值为最小的最佳控制量 $u_{opt}(t)$ 由式(7-44)决定。

$$u_{opt}(t) = K_1 \{g(t) - x_1(t)\} - \{K_2 x_2(t) + K_3 x_3(t)\} \quad (7-44)$$

式中 K_1 : 动作轴的位置反馈增益 Am/rad

K_2 : 动作轴的速度反馈增益 $\text{mA}\cdot\text{s}/\text{rad}$

K_3 : 动作轴的加速度反馈增益 $\text{mA}\cdot\text{s}^2/\text{rad}$

$g(t)$ 是对目标值的现在值和对未来值加权后算出的指令值，可按式近似求出：

$$g(t) = \sum_{i=0}^{n-1} W_i' \cdot \Delta t \cdot r(t+i \cdot \Delta t) + W_n \cdot r(t+t_f) \quad (7-45)$$

$$\Delta t = t_f/n \quad (7-46)$$

$$\sum_{i=0}^{n-1} W_i = 1 \quad (W_i = W'_i \cdot \Delta t, \quad i = 0, 1, \dots, n-1) \quad (7-47)$$

下面以 $W_i, i = 0, 1, \dots, n$ 表示加权系数, t_f 表示未来的时间, n 表示未来值的点数。

图7-19表示算出的加权曲线 $W_n(t_f)$ 和 $W(\tau)'$, ($W_i = W(i \cdot \Delta t)'$)。图7-19(1)是用逆时间求解 $g(t)$ 微分方程式时由基本解终值求得的 t_f 与 $W_n(t_f)$ 的关系曲线, 图7-19(2)是由基本解求得的 τ 与 $W(\tau)'$ 的关系曲线。

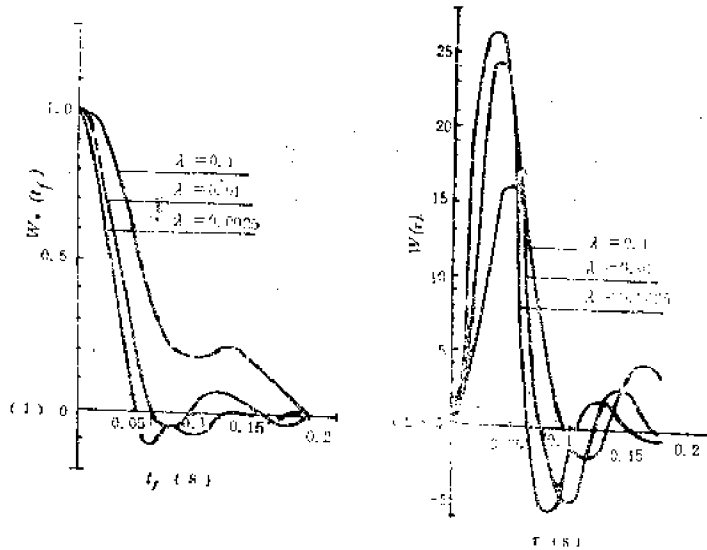


图7-19 $W_n(t_f)$ 与 $W(\tau)'$ 的关系曲线

加权系数, 通过图7-19的加权曲线按下述方法求出。

① 在 $W_n(t_f)$ 、 $W(\tau)'$ 变小之前, 判断是否要使用目标的未来值, 求出未来时间 t_f , 而 W_n 的值由图7-19(1) 求出。

② 确定未来值点数 n , 由图7-19(2) 读取 τ 为 $0, \Delta t, \dots, t_f - \Delta t$ 时的 $W(\tau)'$ 值, 将各值乘以 Δt 后作为 $W_i, i = 0, 1, \dots, n-1$ 。

③ 按读取的值满足式(7-47) 而进行补偿。

为了确认上面求得的 t_f 与 n 的值是否合适, 对图7-18 所示系统加入斜坡函数进行模拟, 求出了 t_f 、 n 与位置偏差绝对值的最大值 E_p 间的关系。其结果如图7-20(1)、(2) 所示。

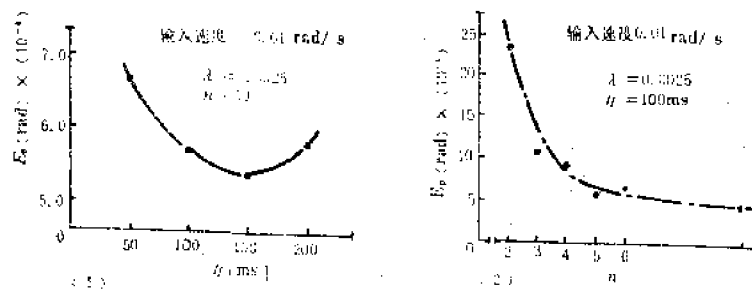


图7-20 E_p 与 t_f 、 n 间的关系曲线

选择 E_r 为评价准则, 是因为本控制方法的目的是使轨迹剧变部分的误差为最小。由图7-20的结果来看, $t_f = 100\text{msec}$, n 为5点就足够了。 λ 是考虑控制量 $u(t)$ 后确定的。

将此控制方法用于工业机器人的连续轨迹控制时有如下优点:

- ① 通过利用目标的未来值, 得到了类似超前校正的效果, 可增加系统的快速性。
- ② 加权系数 W_i 与反馈增益 $K_1 \sim K_3$ 不决定于目标值, 只与工业机器人运动特性有关。

在本机器人中, 如表7-2所示, 在各轴间的相互干扰中, 由于O轴的位置不同, R轴与D轴的转动惯量变化很大。下面结合R轴介绍其补偿方法。图7-18中, 目标值 $R(s)$ 与R轴位置 $X_1(s)$ 的传递函数 $X_1(s)/R(s)$ 为:

$$\frac{X_1(s)}{R(s)} = \frac{b_0 K_1 \sum_{i=0}^n W_i e^{i \cdot \Delta t}}{s^3 + (b_0 K_3 + 2\zeta \omega_n) s^2 + (b_0 K_2 + \omega_n^2) s + b_0 K_1} \quad (7-48)$$

式中 为了保持使转动惯量变化特性也不变, 通过 $K_1 \sim K_3$ 随O轴的变化而变化以使特征方程式的根保持一定。用公式(7-39)~(7-41) 求得的 I_R 与增益 $K_1 \sim K_3$ 的关系如图7-21所示。

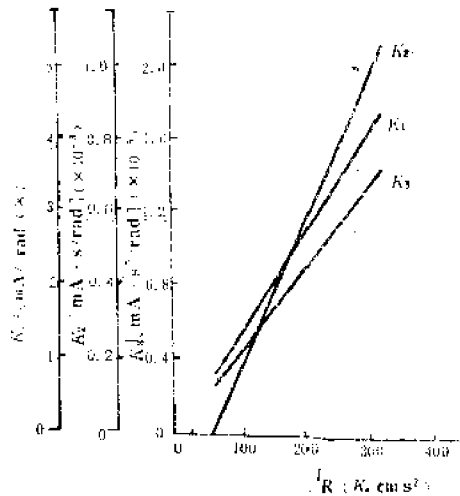


图7-21 K_1 、 K_2 、 K_3 与 I_R 的关系曲线

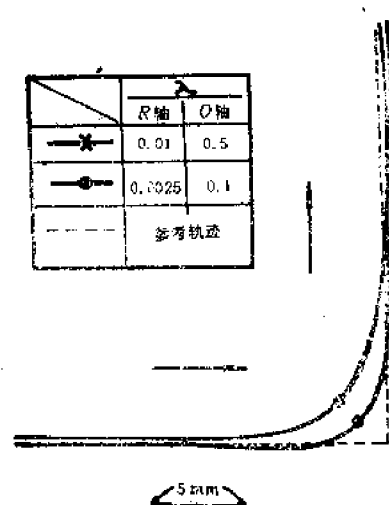


图7-22 拐角部分的模拟结果

(2) 二轴控制系统的模拟

通过对图7-17所示非线性模型的模拟研究了本控制系统的跟踪性能。模拟时令机器人6个自由度中R轴与O轴运动, 对R轴也考虑了O轴转动惯量的变化。目标轨迹是有直角的拐角部分, 作业速度为25cm/s。另外用图7-17中点划线部分的状态观测器推测出速度与加速度进行反馈, 其模拟结果如图7-22所示。由于事先认为目标轨迹变化所以在轨迹剧变之前就已经开始转弯了, 这样的跟踪性能是良好的。图7-22是表示拐角部分的模拟。

(3) 通过一轴电液伺服系统的实验

使用如图7-23所示相当于工业机器人一个轴的电液伺服系统, 验证了此控制方法的

有效性。为了使运算装置中各参数变化容易，实时地对公式(7-45)进行运算，使用了微型计算机，速度和加速度是以电子回路组成的状态观测器进行估计。目标值是用同连续轨迹控制的指令值形状相近的且易于估计的三角波，选择了未来时间 t_f 与未来值点数 n 的适当值。

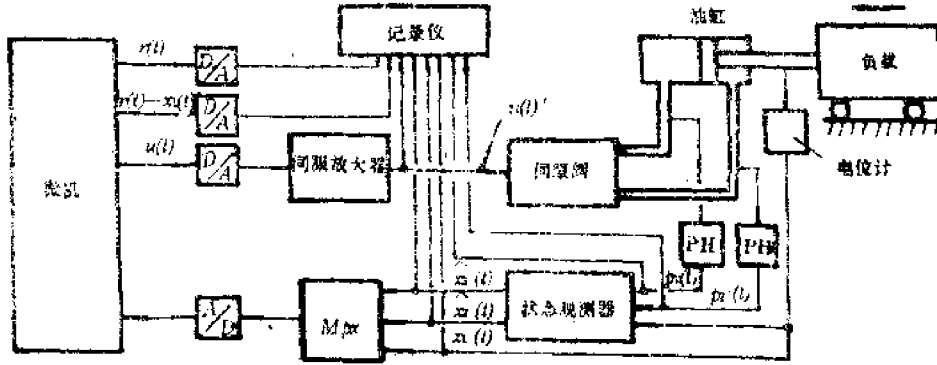


图7-23 电液伺服系统

估计标准仍然取位置偏差绝对值的最大值 E_f 。由实测所得的 t_f 与 E_f 关系如图7-24(1)所示。

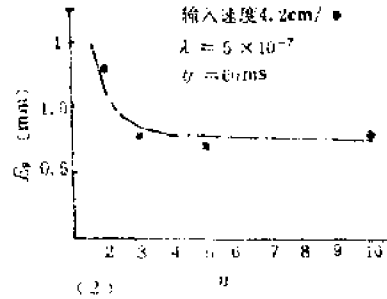
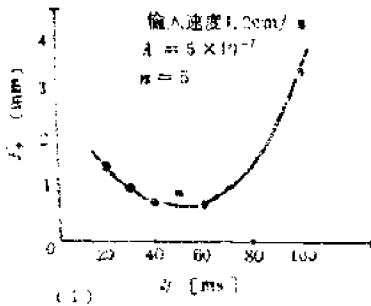


图7-24 E_f 与 t_f 的实测曲线(1)

E_f 与 n 的实测曲线(2)

而 λ 在实验装置中在系统稳定的范围内尽量取小的值。由图(1)可知， t_f 为60ms以内就可以了，此值与计算得到的加权系数值变小的时间是相近的。且 n 与 E_f 的关系如图7-24(2)所示。由图可知， n 为5点时就足够了。

§ 7-3 液压马达关节式机器人电液伺服系统的设计

工业机器人中有多种型式，在装配、弧焊及喷漆等作业中使用最多的是关节型机器人。关节型机器人占地面积小可动作区域广，可以得到多种姿势，这是它的优点。但是另一方面必须进行各轴动作的协调，由于姿势不同，动特性也不同，所以其控制较复杂，这是其缺点。最近又出现了把旋转形执行机构装在关节内直接驱动的机器人，这种机器人虽然有很多优点，但是由于姿势变化则其特性变化比较明显，所以控制也比较复杂。下面介绍其有关的设计与研究成果。

一 关节式机器人的软件伺服控制

为了提高控制系统的伺服特性，一般除了位置反馈外还加入加速度等反馈补偿，但是由于是关节形，所以要进行复杂的运算，故实现起来困难较大。

在此介绍重力和非线性补偿之后再通过反馈和前馈对动特性进行补偿，用这种系统组合的方法其补偿效果较显著。

为使这些补偿更加有效，必须实时且高精度地进行运算，所以大筑等人使用了多CPU软件伺服的控制系统。

1. 关节式机器人与计算机系统

(1) 机器人本体

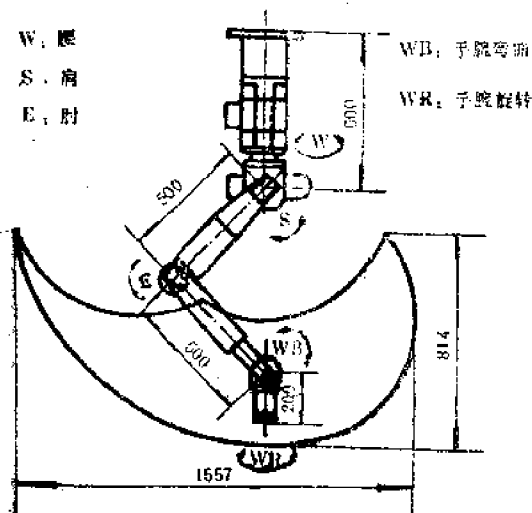


图7-25 机器人简图

机器人是具有腰、肩、肘、手腕弯曲与手腕旋转5个自由度的关节直接驱动型，有10kg力的负载和承受1G加速度的能力。

旋转型执行机构是重量轻输出力矩大的液压驱动，从结构简单和控制性能好的要求出发采用了叶片式摆动马达。位置检测采用光电编码器，在腰、肩、肘3轴上装设了用于特性补偿的压力传感器。该机器人的总体简图如图7-25所示，主要参数见表7-3。

表7-3 机器人主要参考数

型 式	关 节 参 数	
自由度数	5	
运 动 (最大速度)	腰	$\pm 135^\circ$ (80°/s)
	肩	$-90^\circ \sim +10^\circ$ (80°/s)
	肘	$+20^\circ \sim +120^\circ$ (80°/s)
	手腕弯曲	$\pm 135^\circ$ (150°/s)
	手腕旋转	$\pm 135^\circ$ (150°/s)
持 重	10kg	
驱动系统	液压(14GPa)	
总 重	002kg	

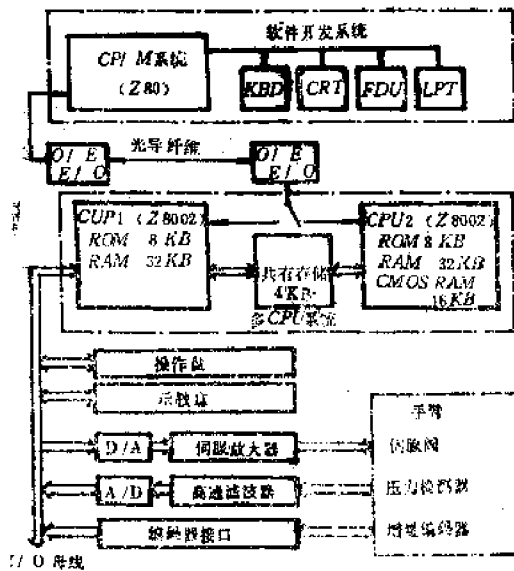


图7-26 计算机系统

(2) 计算机系统

为了提高连续运动性能计算机系统结构采用如图7-26所示。在运算处理部分采用共用存储结合方式的主CPU系统。共用存储结合方式是快速地进行CPU间的信息交换，由于是非同步的，与以前的I/O结合方式相比系统的处理效率较高，具有柔性软件的结构，这是这种系统的优点。

另外，通过光纤通讯连接起来的外部计算机系统用做软件开发、程序调整和特性检测的数据处理等。

2. 指令值的形成

CP控制有二种作法，一种是在示教时各关节的位置信息已记忆下来了，在再现时将其数据依次作为伺服系统的指令而给出的方法；还有一种是插补或坐标变换等复杂的运算是在再现动作之前进行，而将其结果（各轴的指令）存储起来的方法。这些方法中实时处理计算较少，可用小型计算机系统来进行，这是其优点。但是它不能对传感器检测的位置、姿势的反馈或用直角坐标系示教的操作机能实时地实现坐标变换，且存储的数据多。为了解决上述问题，这种方法就是高速地进行由位置、姿势求取各轴指令值的运算，可实时地实现位置与姿势的控制。此外把记忆再现机能时的插补运算（直线、圆弧）分成事前运算与实时运算两部分，使高速实时处理成为可能，需要记忆的数据量也变少了。下面介绍形成指令的方法，同时讨论运算时间与精度。

(1) 指令值的形成方法

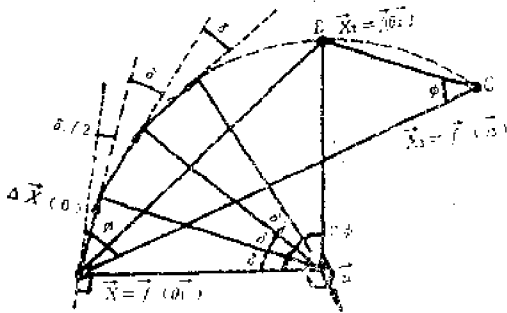
以各轴的位置 $\vec{\theta} = (\theta_W, \theta_S, \theta_E, \theta_{WB}, \theta_{WR})^T$ 记忆的示教数据用下述方法进行插补，使之形成各轴的指令值。

1. 由示教的数据求取手部的的位置与姿势。此运算就是坐标变换，以下式定义

$$\vec{X} = \vec{f}(\vec{\theta}) \quad (7-49)$$

式中把手部的的位置与姿势以固定在机器人动作空间的直角坐标系坐标 $\vec{X} = (x, y, z)^T$ 表示，把姿势以 $\vec{C} = (\alpha, \beta)^T$ 、 $\alpha = \theta_S + \theta_E + \theta_{WB}$ 、 $\beta = \theta_{WR}$ 表示，则 $\vec{X} = (\vec{x}, \vec{C})^T$ 。

2. 应用求得的位置与姿势（直线为2点圆弧为3点）求出3的插补参数，即位



$$N = \frac{AB}{VT} \cdot \frac{\phi}{\sin \phi}$$

$$\Delta \vec{x}(0) = VT \cdot \vec{R}(-\phi + \frac{\delta}{2}) \cdot \frac{\vec{AB}}{AB}$$

$$\Delta \vec{C} = (\vec{C}_2 - \vec{C}_1) / N$$

$$\vec{u} = (u_x, u_y, u_z)^T = \frac{\vec{AB} \times \vec{BC}}{|\vec{AB} \times \vec{BC}|}$$

$$\vec{R}(\psi) = \begin{bmatrix} \cos \psi & -u_2 \sin \psi & -u_3 \sin \psi \\ u_x \sin \psi & \cos \psi & -u_x \sin \psi \\ -u_3 \sin \psi & u_x \sin \psi & \cos \psi \end{bmatrix}$$

$$\delta = 2\phi / N$$

图7-27 圆弧插补

置的初始值 $\vec{x}(0)$ ，姿势的初始值 $\vec{C}(0)$ ，每一插补周期 T 的位置增量初始值 $\Delta \vec{x}(0)$ ，姿势增量的 $\Delta \vec{C}(0)$ 以及分割数 N ；旋转矩阵 $R(\delta)$ 。其中，在轨迹长度为 L ，动作速度为 V 时， $N = L/(VT)$ ，对圆弧插补 $R(\delta)$ 是以包括圆弧在内的平面上使 $\Delta \vec{x}$ 旋转 δ 的矩阵；对直线插补， $R(\delta)$ 是单位矩阵。圆弧插补时的详细处理方法见图 7-27。

③对每一个周期进行位置与姿势的插补。其中 $n = 1, \dots, N$ 。

$$\vec{x}(nT) = \vec{x}((n-1)T) + \Delta \vec{x}((n-1)T) \quad (7-50)$$

$$\Delta \vec{x}(nT) = R(\delta) \cdot \Delta \vec{x}((n-1)T) \quad (7-51)$$

$$\vec{C}(nT) = \vec{C}((n-1)T) + \Delta \vec{C} \quad (7-52)$$

④由 $X(nT) = (x(nT)^T, C(nT)^T)^T$ 求各轴的指令值。此运算为座标的逆变换，以下式定义

$$\vec{\theta} = \vec{g}(\vec{X}) \quad (7-53)$$

在①~④的各种处理中，为了实现上述的传感器反馈或示教操作的机能，对③、④有必要进行实时的处理（由于机能的的不同③的处理有些不同）。为此在该系统中对③、④进行实时处理，而对①、②在示教时就提前处理好了。这种方法中必要的的数据是每个示教点是 20 数码，所以与前面介绍的把全部指令值都记忆下来的方法相比，记忆的容量可以变小。

(2) 运算精度与时间

为了使前面介绍的实时处理能高速地进行，运算的所有字长都是用 32 位固定小数点进行，程序以汇编语言来表述。另外三角函数的运算是通过 128 点的函数盘的一次插补进行的。为了评价此程序（实时程序）的计算精度是以倍精度浮动小数点运算程序（叫做评价程序，假定它没有误差）进行的。若以 $\vec{X}_1 = (x_1^T, c_1^T)^T$ 为计算值， $\vec{X}_2 = (x_2^T, c_2^T)^T$ 为真实值时，则位置误差为 $|x_1 - x_2|$ ，姿势误差为 $|c_1 - c_2|$ 。

① 坐标变换的精度

坐标变换的误差是由每个计算的舍入误差和三角函数的插补误差产生的。为了综合地估计这些误差，对机器人活动范围的 2000 个估计点求出了坐标正变换与坐标反变换的误差。但是坐标反变换是用实时程序将 \vec{X} 进行坐标反变换，用估计程序将所得到的关

表 7-4 坐标变换误差

函数	位置 (mm)			姿势 ($\times 10^{-2}$ 度)		
	最大	平均	σ	最大	平均	σ
$\vec{X} = f(\vec{\theta})$	0.078	0.030	0.010	0.43	0.15	0.10
$\vec{\theta} = \vec{g}(\vec{X})$	0.094	0.029	0.016	1.00	0.34	0.22

节角进行坐标正变换得到 \vec{X}_1 ，再用 \vec{X}_1 与 \vec{X}_2 的比较求出座标变换的误差。表7-4就是所得的结果。两种变换的误差都在0.1mm以内，姿势误差在0.01°以内，可见其精度是很高的。

② 插补精度

在式(7-50)的插补运算中 Δx 的有效位数为16位，如图7-28所示，是把 M 位的误差加在 x 中。由于此 Δx 反复地加到 x 上，所以插补精度主要是与 Δx 的分辨率有关，所以为了提高精度必须使 M 加大。但是由于 $|\Delta x|$ 是与速度成比例的量， M 是受动作速度 V 的限制。插补误差的例子如图7-28所示。

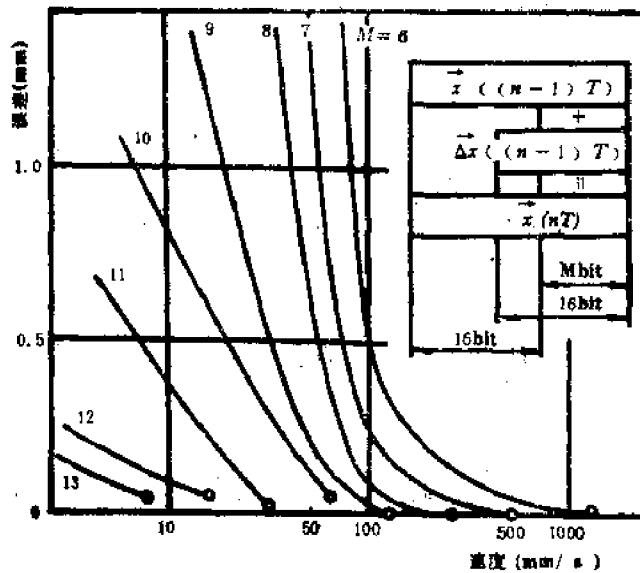


图7-28 插补误差

该图是表示把 M 与 V 变化后沿各种圆弧插补时圆弧终点的最大位置误差。误差是受轨迹长度影响的，但是在 $V \leq 100 \text{ mm/s}$ 时，取轨迹长为1000mm， $V > 100 \text{ mm/s}$ 时为 $10V \text{ mm}$ 。如该图所示，在较宽的速度范围内，为了得到高的插补精度必须使 M 随速度的不同而变化。这一点在直线插补时对位置、姿势的插补，以及圆弧插补时对姿势的插补都是一样的（但是由于式(7-51)的 $R(\delta) \cdot \Delta x$ 的乘法不需要所以与图7-28相比 M 的影响较小）。所以对本系统来说是依速度改变 M 。

③ 处理时间

坐标正变换2.2ms，坐标反变换3.8ms，进行式(7-50)~(7-52)的插补运算为0.2ms，可以说这是高速的运算。由此可实现插补周期为4ms左右的实时直线、圆弧插补。

3. 用软件伺服的特性补偿

在前面介绍了机器人进行作业时位置指令的形成方法。为了提高机器人控制性能，必须通过提高各关节伺服系统的稳定性、快速性及位置精度，才能高精度地跟踪位置指令值。图7-29是各轴伺服系统的方框图。为了提高静特性要补偿重力或摩擦力等的非线性

性，其次为了提高液压系统的稳定性与快速性，进行速度反馈与动压反馈补偿(DPF)。进而为了减少CP动作时的跟踪迟后，进行了速度、加速度前馈及未来值补偿。

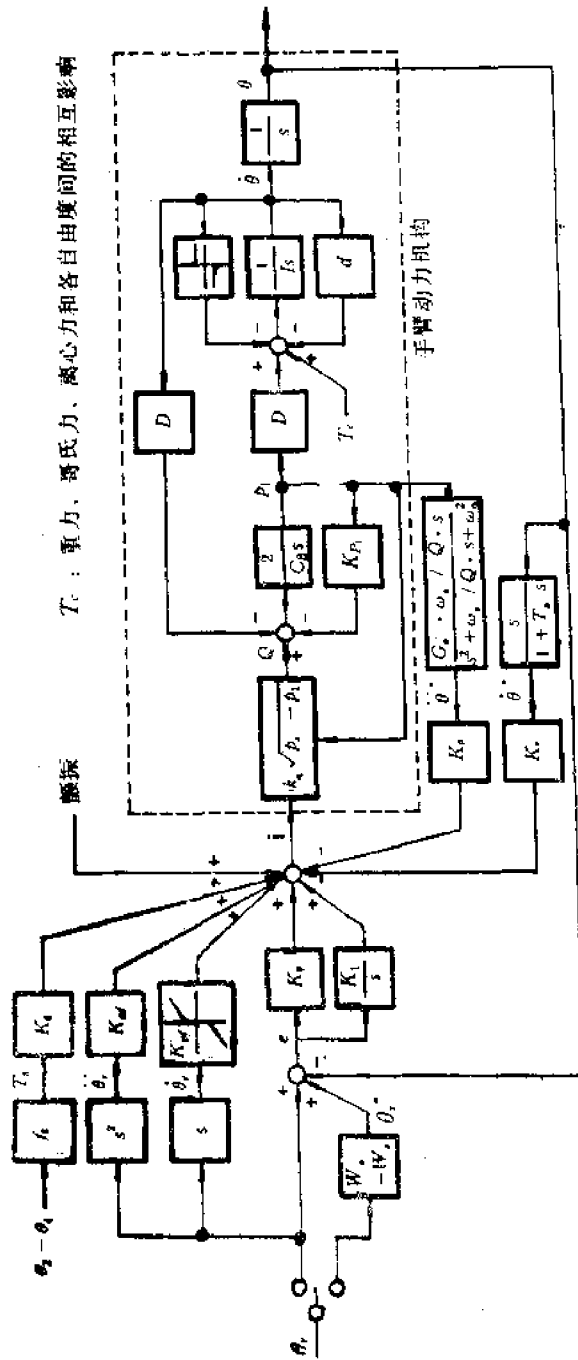


图 7-29 每个自由度的伺服系统

(1) 静特性补偿

为了提高各轴伺服系统的静特性，进行了重力补偿、摩擦补偿及积分补偿。机器人手臂的运动方程式如下，

$$I(\theta)\ddot{\theta} + f(\theta, \dot{\theta}) + v \cdot \dot{\theta} + g(\theta) = T \quad (7-54)$$

式中 T 为力矩; $I(\theta)$ 为惯性矩阵; $f(\theta, \dot{\theta})$ 为哥氏力及离心力; v 为粘性摩擦矩阵; $g(\theta)$ 为重力。在静止时, 执行机构的输出力矩与重力相平衡, 此重力矩是造成稳态位置偏差的原因。

图7-30中曲线 1 是使肘关节低速 (1deg/s) 运动时位置偏差的检测值, 重力的影响最大产生 0.3deg 的位置偏差。横轴是用手臂各部的重量及关节角度计算出来的重力力

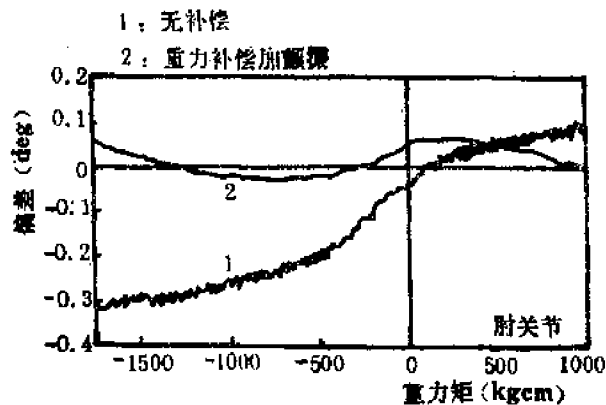


图7-30 重力补偿的偏差及颤振

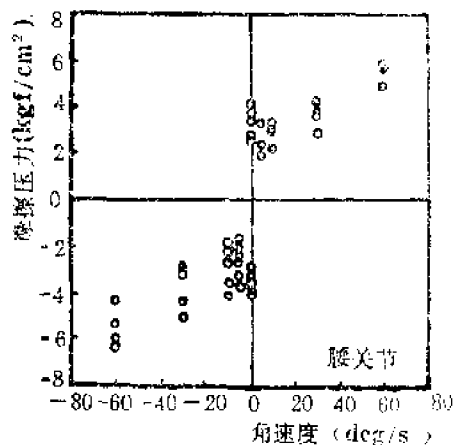


图7-31 摩擦特性

矩。肘的最大重力矩为 $\pm 200\text{N}\cdot\text{m}$, 因为伺服电流-力矩特性在此区域内可看成是线性的, 所以可按式进行重力补偿:

$$i_g = K_g \cdot T_g + i_{g0} \quad (7-55)$$

式中 i_g 为进行重力补偿的控制量; K_g 是重力补偿增益, T_g 是重力力矩算出值, i_{g0} 是常数。图7-30的曲线 2 是重力补偿的效果。通过此补偿重力误差在 0.1deg 以内, 则手部为 1mm 以内的误差。

对重力不能消除的稳态误差实行积分补偿。在积分输入中假设有很小的死区, 用以防止极限环振荡的发生。又积分补偿增益 K_i 是按不破坏稳定性的程度给定了很小的值。

图7-31是摩擦特性的例子。静摩擦力控制在油源压力的 3% 左右, 静摩擦与动摩擦的差值并不大。

颤振电流是用软件制成矩形波 (83Hz, 约为额定电流的 2%), 通过与控制量的合成, 可实现如图7-30曲线 2 所示的平稳运动, 从而减少了摩擦的影响。

(2) 反馈补偿

① 速度及压力反馈补偿

以电液伺服机构控制的各轴液压系统如图7-29方框图的虚线内所示, 其传递函数可用下面的 3 阶系统近似。

$$G_o(s) = \frac{\omega_n^2 K_o}{(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)s} \quad (7-56)$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{2(K_{p,i}d + D^2)}{C_s I_0}} \approx \sqrt{\frac{2D^2}{C_s I_0}}$$

$$\xi = \frac{C_s d + 2K_{p,i} I_0}{2\omega_n C_s I_0} \approx \frac{K_{p,i}}{\omega_n C_s}$$

式中 ω_n 是固有频率； ξ 为阻尼比； K_0 为电流-速度增益； $K_{p,i}$ 为泄漏系数； d 为粘性阻力系数； D 为作用体积； C_s 为液压系统的压缩率； I_0 为臂的转动惯量。

对这样的3阶系统，通过位置、速度及加速度反馈，理论上可实现任意的快速性与稳定性。实际上因受伺服阀流量饱和和线性化时忽略的高阶项的影响，以及速度检测时的滞后误差与动压反馈（DPF）滞后等影响，其快速性是有限界的。

速度反馈是用位置检测微分后求得的速度信号，其式如下：

$$\dot{\theta}_n = a \cdot \dot{\theta}_{n-1} + (1-a) \cdot (\theta_n - \theta_{n-1})/T \quad (7-57)$$

式中 $\dot{\theta}_n$ 、 $\dot{\theta}_{n-1}$ 分别是现在及前一个采样时间的速度计算值； θ_n 、 θ_{n-1} 是位置检测值； a 是系数（ $a=0.25$ ）。另外以压力反馈取代了加速度反馈。由于使用了让加速度成分通过，滤掉由重力产生的直流成分与颤振的成分的高通滤波器，所以可得到与加速度反馈相同的效果。

为了使这种补偿的效果明显，对只有位置反馈和增加速度、加速度反馈的两种情况都加以位置的斜坡函数，对其速度的响应特性进行了对比，其结果如图7-32所示。后者的稳定性与快速性都得到了提高。

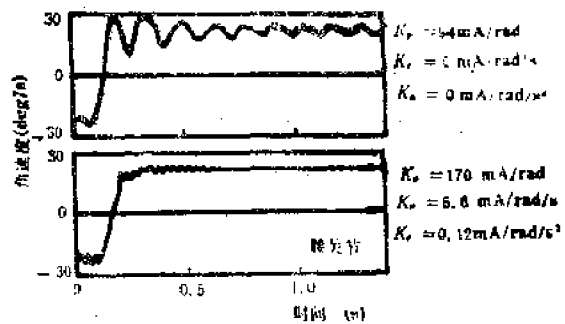


图7-32 反馈补偿的误差

增益的确定方法是，首先构成速度控制系统（ $K_p=0$ ），调节 K_v 、 K_a 之后，使速度阶跃响应的快速性与阻尼特性提高。

然后，使之变成位置控制系统，作为位置指令值加一斜坡输入，在速度响应不发生振荡

表7-5 各轴的参数

	腰	肩	肘	手腕弯曲	手腕旋转
K_p	46.8	92.0	50.0	26.6	10.2
K_v	1.38	1.77	0.24	—	—
K_a	0.11	0.061	0.046	—	—
K_0	0.241	0.269	0.325	0.829	1.92
ω_n	50	63	94	90	140
ξ	0.4	0.6	0.8	0.7	0.6
$K_{v,i}$	5.52	5.48	3.32	1.21	0.521
$K_{a,i}$	0.176	0.132	0.098	1.87×10^{-2}	4.47×10^{-3}
λ	4.57×10^{-4}	1.2×10^{-4}	4.0×10^{-3}	—	—
$K_{v,s}^*$	0.872	1.63	0.56	—	—
$K_{a,s}^*$	1.9×10^{-2}	2.2×10^{-2}	7.6×10^{-3}	—	—
$W_0 \sim$	0	0	0	—	—
W_5	0.090	0.247	0.306	—	—
	0.246	0.402	0.312	—	—
	0.236	0.204	0.130	—	—
	0.132	0.064	0.083	—	—
	0.296	0.083	0.196	—	—

的范围内。调查区 尽可能达到十的倍 其结果与按性别比率 2.5 由

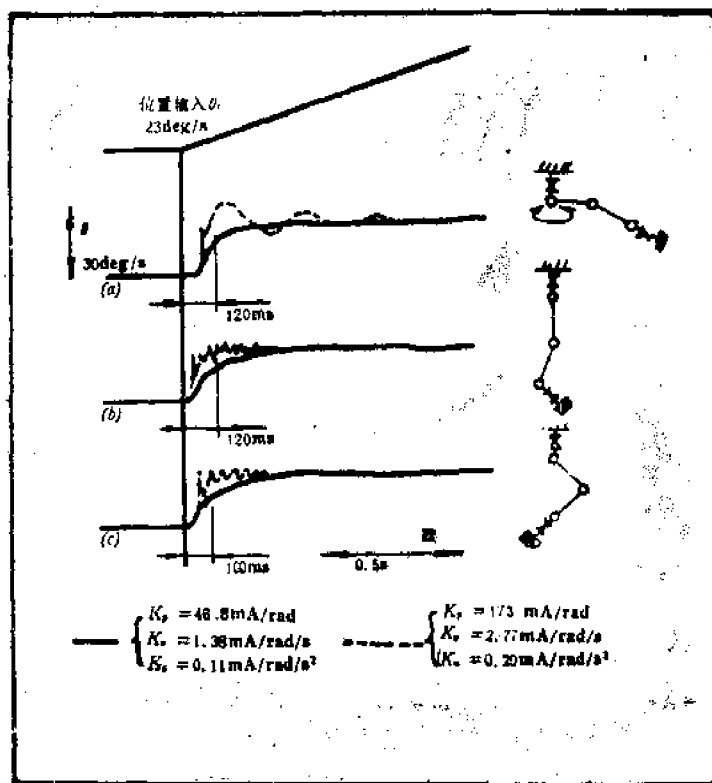


图7-35 由姿势引起的特性变化

(3) 前馈补偿

由前面介绍的特性补偿可以提高稳定性与精度，对于点到点的控制其特性是相当好的。但是在连续控制时却产生跟踪伺服系统的迟后，将它们合成后，就形成了手部的误差。其解决办法是研究速度、加速度前馈补偿与目标未来值的补偿。

① 速度与加速度前馈

如式(7-56)所示的3阶系统，图7-36所示控制方式是有效的。位置偏差对位置

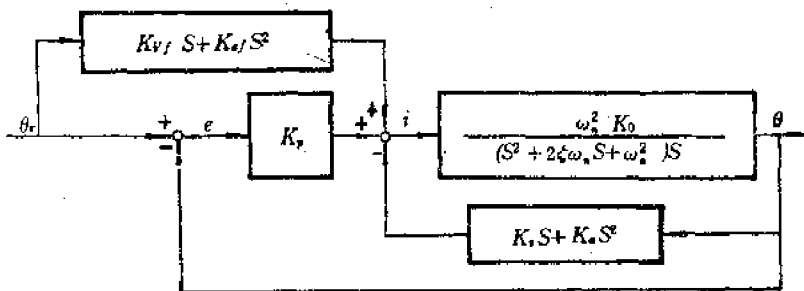


图7-36 前馈补偿控制系统

指令值的传递函数如下：

$$G_1(s) = \frac{s^3 + (2zeta\omega_n + K_p K_0 \omega_n^2 - K_{v_f} K_0 \omega_n^2) s^2 + \omega_n^2 (1 + K_p K_0 - K_{v_f} K_0) s}{s^3 + (2zeta\omega_n + K_p K_0 \omega_n^2) s^2 + \omega_n^2 (1 + K_p K_0) s + K_p K_0 \omega_n^2}$$

(7-58)

为使常值加速度指令值也不产生误差，按下式给定前馈增益 $K_{v,f}$ 、 $K_{a,f}$

$$K_{v,f} = \frac{1}{K_0} + K_v \quad (7-59)$$

$$K_{a,f} = \frac{2\xi}{K_0\omega_n} + K_a \quad (7-60)$$

表7-5中列出了此数值。关于综合地确定 K_p 、 K_v 、 K_a 、 $K_{v,f}$ 及 $K_{a,f}$ 的方法，现以最佳调节器问题进行简单的介绍。取 A 、 b 、 c 、 x 及目标函数为 J_1 ，则

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\omega_n^2 & -2\xi\omega_n \end{bmatrix}, \quad b = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ K_0\omega_n^2 \end{bmatrix} \quad (7-61)$$

$$C = [1 \quad 0 \quad 0], \quad x^T = [\theta \quad \dot{\theta} \quad \ddot{\theta}]^T$$

$$J_1 = \int_0^{\infty} \{ (y - \theta_s)Q(y - \theta_s) + (u - u_s)P(u - u_s) \} dt \quad (7-62)$$

式中 $Q = 1$ ， $P = \lambda$ ， u_s 是控制量的稳态值。使 J_1 为最小的最佳控制量 U_{opt} 为

$$u_{opt} = K_p(\theta_s - \theta) - K_v\dot{\theta} - K_a\ddot{\theta} + K_{v,f}\dot{\theta}_r + K_{a,f}\ddot{\theta}_r \quad (7-63)$$

式中

$$K_{v,f} = \frac{1}{K_0} + K_v \quad (7-64)$$

$$K_{a,f} = \frac{2\xi}{K_0\omega_n} + K_a \quad (7-65)$$

由式(7-63)~(7-65)得出与图7-36相同结构的控制系统。使 K_v 与表7-5一致而给定 λ 时求得的 K_p 、 K_a 写成 K_p^* 、 K_a^* ，列于表7-5中。

参考上面的计算值之后，速度前馈补偿取为

$$i_{v,f} = K_{v,f}\dot{\theta}_r + i_{v,f0} \cdot \text{sign}(\dot{\theta}_r) \quad (7-66)$$

式中 $i_{v,f}$ 是速度前馈的控制量， $\dot{\theta}_r$ 是速度指令值， $i_{v,f0}$ 是常数。这是在电流-速度特性的原点附近，由于执行机构内部泄漏有很小的死区，对线性补偿来说，是由于低速时跟踪的迟后变大造成的。另外，速度指令值 $\dot{\theta}_r$ 及加速度指令值 $\ddot{\theta}_r$ 是按式把位置指令值 θ_r 差分而求得。

$$\dot{\theta}_r = \{ \theta_r(n+1) + \theta_r(n) - \theta_r(n-1) - \theta_r(n-2) \} / 4T \quad (7-67)$$

$$\ddot{\theta}_r = \{ \theta_r(n+1) - \theta_r(n) - \theta_r(n-1) + \theta_r(n-2) \} / 2T \quad (7-68)$$

为了表示补偿效果下面取 $K_{a,f} = 0$

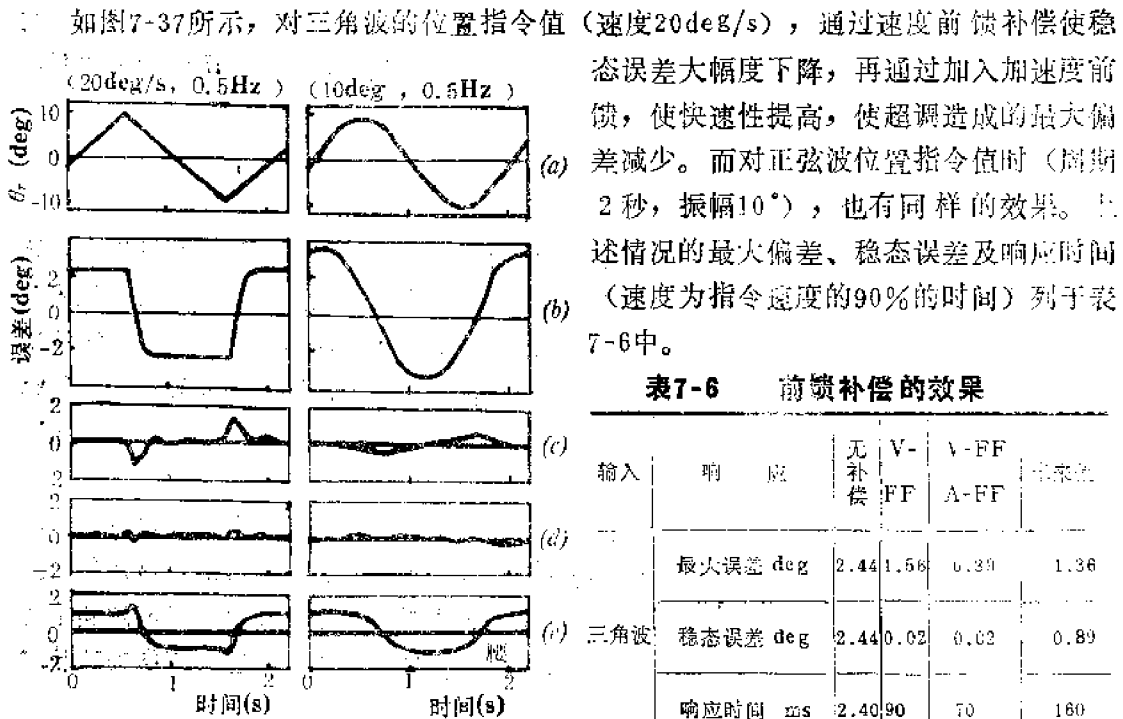


图7-37 前馈补偿的效果

(a)输入信号, (b)未补偿 (c)速度前馈补偿
(d)速度与加速度前馈补偿 (e)未来值

表7-6 前馈补偿的效果

输入	响 应	无补偿	V-FF	V-FF A-FF	未来值
三角波	最大误差 deg	2.44	1.56	0.39	1.36
	稳态误差 deg	2.44	0.02	0.02	0.89
	响应时间 ms	2.40	90	70	160
正弦波	最大误差 deg	3.58	0.61	0.25	1.16

V-FF: 速度前馈
A-FF: 加速度前馈

② 未来目标值补偿

在前面介绍的速度，加速度前馈补偿使跟踪误差大为减少。但是由于是利用指令值的微分，所以在三角波的顶点等处动作变化剧烈且发生超调。

解决的办法是未来目标值补偿是有效的。取目标函数 J_2 为

$$J_2 = \frac{1}{2} e^T(t+t_f) F e(t+t_f) + \frac{1}{2} \int_t^{t+t_f} (e^T Q e + u^T R u) dt \quad (7-69)$$

当取 $Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, R = \lambda$ (7-70)

最佳操作量 u_{opt} 为

$$u_{opt} = K_p^*(\theta_t^* - \theta) - K_v^* \dot{\theta} - K_a^* \ddot{\theta} \quad (7-71)$$

$$\theta_t^*(t) = W_0 \cdot \theta_t(t) + W_1 \cdot \theta_t(t + \Delta t) + \dots + W_5 \cdot \theta_t(t + 5 \Delta t)$$

如 λ 与上节取相同值时，则 K_p^* 、 K_v^* 、 K_a^* 与表7-5 的值相同，同样未来目标值的加权系数 $W_0 \sim W_5$ 就可求出来了。但是 $\Delta t = 24ms$ ， $t_f = 120ms$ 。而 $\theta_t^*(t)$ 是在 $24ms$ 间隔上的 5 点前的位置指令值组成新的位置指令值。 $t_f = 120ms$ 是参考图 7-35 所示的闭环时间常数决定的。

为了表示未来目标值补偿的效果，与速度·加速度前馈时一样也进行了检测，其结

外，液压能源及控制部分等都装在机器人的本体上了。

图7-38是二足步行机器人WHL-11的结构图。

图7-39是各自由度的布置图。

机器人WHL-11的参数如表7-7所示。

此机器人的系统如图7-40所示是由以各关节的旋转执行机构旋转角为指令的控制系统、根据角度指令驱动关节的液压系统以及肢体组件组合而成的。液压系统是由油源与接受微机指令的伺服回路（伺服阀和旋转执行机构的组合）组成的。下面介绍该机器人系统的各有关部分。

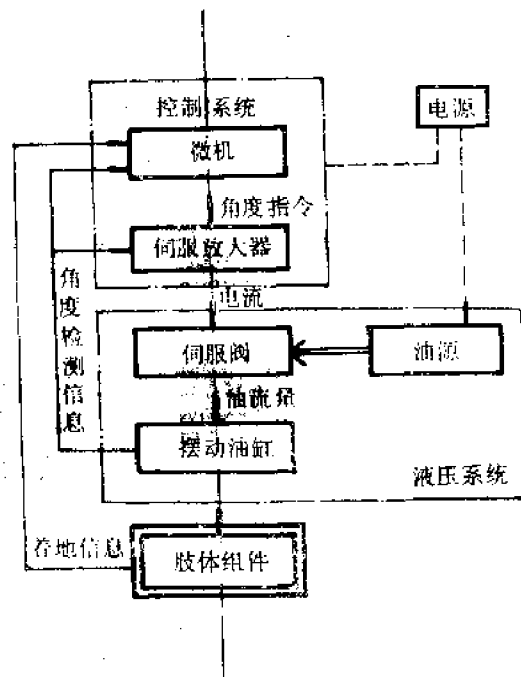


图7-40 机器人控制系统图

表7-7 机器人的参数

项 目	内 容
机器人分类	多关节机器人(12个自由度)
动力源	电缆供电方式
关节驱动方式	旋转执行机构+伺服阀(液压式)
主要结构材料	碳纤维增强塑料(CFRP)
控制装置	16位微型计算机
控制软件	内有步行模式的输出
步行速度	步距约为50cm,1步约10s
步行方式	直线行走与转换方向
尺 寸	外形尺寸:约B660×W600×H1450,腿长900mm
重 量	约120kg

(2) 肢体组件

机器人WHL-11的腿脚具有与人相似的外观。在相当于人的腰部上有使腿前后动作的纵向自由度以及左右动作的摆动自由度，在膝关节处有俯仰运动，脚腕关节处有俯仰与旋转2个自由度，另外在大腿部还有使腿偏转的自由度。以此代替人由腿到腰的柔软扭转机能。如上所述单腿有6个自由度，两腿共12个自由度，因此WHL-11可实现与人相类似的步行动作。

人的关节在骨骼上配有肌肉，其工作机理是通过控制肌肉的伸缩运动而使关节旋

转。与此相反，此机器人是使用了旋转执行机构。

肢体组件的课题是研究重量轻强度高的材料。为了在步行时减轻执行机构的负担，对装在本体上的零部件以及肌体组件的材质力图使之体积小重量轻。其中肌体组件使用了重量轻强度高的碳纤维强化塑料（CFRP）。虽然CFRP有强度高弹性好的特点，但是由于零件的形状复杂其成型加工非常困难，一般在机器人中只是部分地使用。但是这次由于研制了新的成型加工技术，复杂的零件也可使用CFRP了。所以大幅度地减轻了重量。

（3）液压系统

液压系统的组成如图7-41所示。是由装在腰部的油泵，电动机装置与12个伺服阀以及旋转油缸组成。由于在目前的情况下液压执行机构的力矩/重量比远大于电动机，所以采用全液压驱动。

但是一般而言油源体积较大，而这次采用了变换器驱动，通过使用航空用的油泵-电动机装置上述问题得到了解决。油源参数如表7-8所示。油箱是胶袋形式加压，可使油泵的自吸性能提高的同时，还

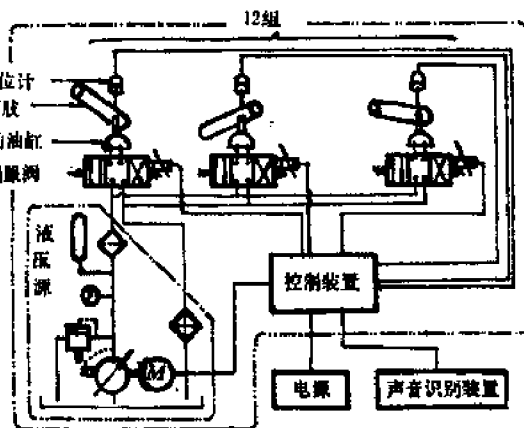


图7-41 二足步行机器人的液压系统组成

表7-8 油源参数

电 源	AC 200V 400Hz	
电 动 机	型式	高频1M
	功率	1.4KW
	极数	8极
	转数	7900 rpm
	冷却方式	空气冷却
外形尺寸	φ129×141L	
油 泵	型式	轴向柱塞泵（带压力补偿）
	工作压力	7MPa
	流量	10 l/min
	外形尺寸	80×130×193

可吸收油面波动。由于现有的油箱、蓄压器和冷却器等都太重所以都是特别设计制造的。油源装置布置在600×600的平板上，以油泵与马达为中心，左侧是油箱与冷却器，右侧是蓄压器、滤油器及溢流阀，布置得很紧凑。

使马达功率变小的条件是使伺服阀和旋转油缸的泄漏为最小。同时还要彻底减轻重量，这两者是相互矛盾的，为了对两者协调作了很大努力。各旋转油缸的参数如表7-9所示，分为4种尺寸大小。旋转油缸的力矩重量比，由于壳体采用高强度铝所以最高达到7.4，这个数值比电动机大10倍以上，所以充分发挥了液压执行机构的特点，同时与以往的液压方式相比也有所提高。

在旋转型执行机构中保持摩擦力矩小与泄漏小是很重要的。经过很多努力每个旋转油缸在最大压力差下平均为0.3 l/min以

表7-9

旋转油缸参数

项目	位置		脚腕		膝		腰			
	俯	仰	旋	转	俯	仰	俯	仰	旋转	转换方向
输出力矩 (kgf·m)	20		10		10		20		15	5
可动角 (deg)	60		45		45		60		45	90
叶片数 (片)	2		2		2		2		2	1
重量 (kg)	2.7		2.0		2.0		2.7		2.3	2.0
力矩重量比 μ (kgf·m/kg)	7.4		5.0		5.0		7.4		6.5	2.5
外形尺寸 (mm)	85×90.5 ×110 ^L		82×82×95 ^L		82×82×89 ^L		85×86.5 ×110 ^L		85×86.5 ×96 ^L	82×82×96.5 ^L
内泄漏量 (l/min)	0.3 l/min 以下									

下的泄漏量已经实现了。因为在步行时，12个旋转油缸不是同时都承受最大压力差，有的是处于中间零位状态，所以全部旋转油缸的泄漏是实际满足要求的数值。

同时他们又结合此机器人的液压系统研制了具有泄漏小的微型力马达的伺服阀，其结构如图7-42所示。因为以前常用的喷嘴挡板阀泄漏较大不适于装在机器人上。

这次研制的直动型伺服阀，是世界上少有的形式，额定流量为3 l/min，压力为7 MPa，重量为260g。

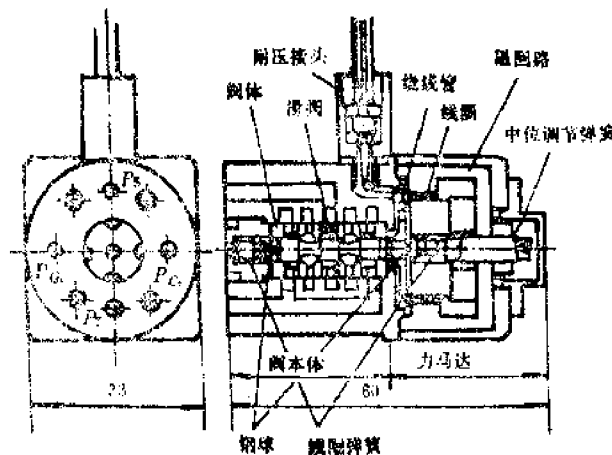


图7-42 微型力马达形伺服阀的结构图

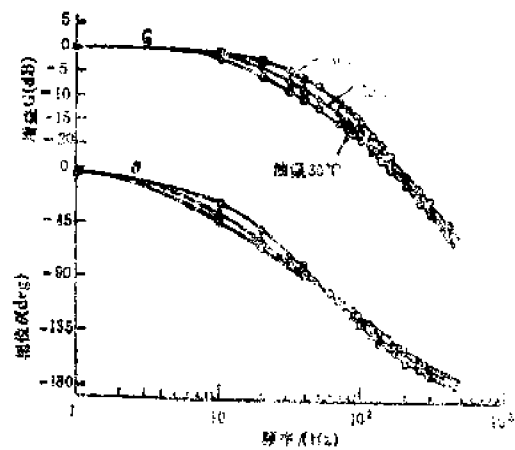


图7-43 微型力马达形伺服阀的频率特性

在力马达形的伺服阀中，通过滑阀的重叠以及滑阀与阀套间的间隙最佳化可使中立点（零位）泄漏减小，实际作到了0.1 l/min以下，这仅相当于泵流量的1%，以前的阀大约为1/3左右。力马达形伺服阀的最大问题之一是如何增加阻尼。这次因为小型化的严格要求不能采用电气阻尼的方式。经过反复研究的结果，全部都采用了液压阻尼的方法。用这种方法即使油温变化也可得到稳定的响应，可以对旋转油缸进行精确地控制。伺服阀的频率特性如图7-43所示，相位迟后为90°时约为50Hz。

经过以上的研制生产，制造了泄漏小的电液伺服阀和旋转油缸硬件，同时以高频电动机组成了体积小重量轻的油源装置，所以实现了液压系统的小型化与轻量化，从而使整个机器人的结构变得比较紧凑。

虽然这种机器人在步行时不可避免地要产生冲击，但是由实验结果表明，装在机器人本体上面的微机与电液伺服阀等设备并没有因为冲击而发生任何异常现象，这可认为伺服阀有足够的阻尼，说明设计的指导思想是正确的。

(4) 控制系统

控制系统相当于人的脑神经系统，它具有把来自机器人各部的传感器信息经过运算处理变成各关节的角度的指令和决定肢体组件动作的机能。控制系统的硬件如图7-44所示，以进行关节角指令运算的16位微机为中心以信息母线同其它设备进行信息交换。装有将数字信号变成连续电信号之后传给连续伺服系统的D/A转换器、由电位计读出关节角信息的A/D转换器、由脚底接地开关来的输入信息以及同控制盘进行信息交换的I/O接口等设备，记忆装置是存储控制程序和一系列关节动作数据，其ROM为256KB，微机运算作业的RAM为128KB。

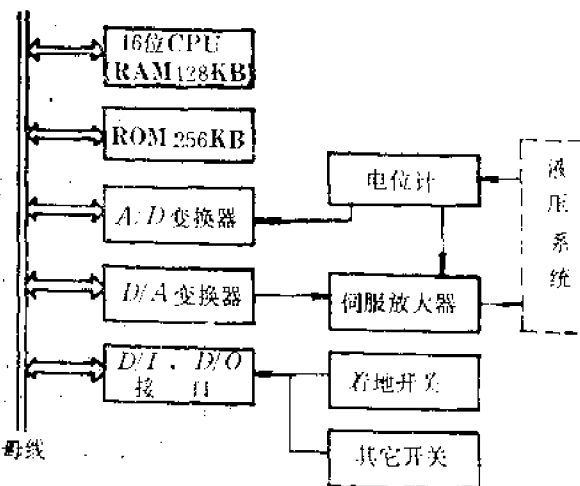


图7-44 二足步行机器人的控制系统

连续伺服系统是通过伺服放大器将来自D/A转换器的电信号放大之后供给液压系统，被驱动的关节角以电位计检测后返回到伺服放大器以形成位置反馈回路。

3. 准动步行的实现

二足步行，必须有一支脚支持身体的时间存在，为此要求高度的平衡技术。这一点是与车轮型或履带型以及4足、6足等多足行走不同的，所以是研制二足行走机器人时的最大课题。

根据平衡与控制水平的不同，二足行走可分为静步行与动步行两种形态。

(1) 静步行

重心位置总是在脚底面内的步行方法，只用静力学平衡考虑的控制来进行。

(2) 动步行

这是人类常用的步行，这种步行其重心位置基本上是由脚底面向前方移开的状态保持稳定。由于在目前全自动形动步行的控制技术还是较难的，所以该机器人采用准动步行的方法。所谓准动步行是只在交换支持重心脚的交换时间（立脚变换期）实现动步行。与静步行相比其步长大并且可望实现高速步行。

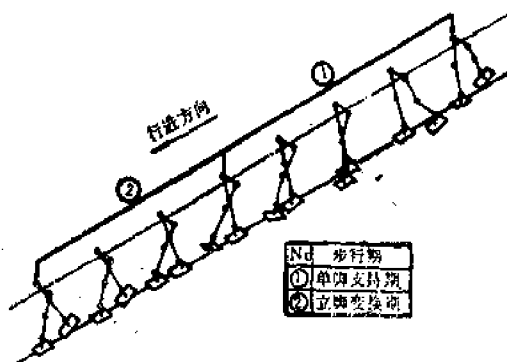


图7-45 准动步行概念图

此步行的概念以图7-45的立体形式表示，步行周期可分为以单脚支持重心的单脚支持期与立脚变换期。

稳定步行的控制

当考虑脚与地板间并非光滑的情况时，动步行时由于重心上作用着重力与步行动作时产生的惯性力，可以它们的合力在地板面上的投影点作为判断步行稳定性的标准。当力与力矩总和为零的点叫做零力矩点。

在准动步行中，零力矩点如图7-46所示在单脚支持期内是在脚底面内，在立脚变换期是在两脚底之间，按这样进行决定各关节角度、角速度及角加速度等的步行分析，需要能够反映对它们的动态控制。但是在多关节机器人的动态控制中要进行很多矩阵的运算，由于此机器人有12个自由度，用装在机器人本体上的计算机进行实时处理现在还是比较困难的。

于是事先进行步行分析的模拟，作成几个步行模式（由机器人连续动作中取出离散的连接数据），然后把它们存储在控制用的计算机中，用此方法解决上述的问题。

用这种方法对 WHL-11 进行稳定的步行控制已经得到了验证，可以实现每步约为10秒的准动步行。图7-47是WHL-11的步行状态，实现了动态的运动。

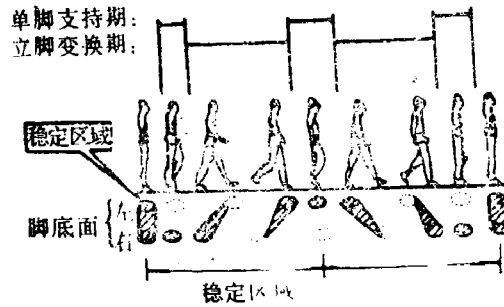
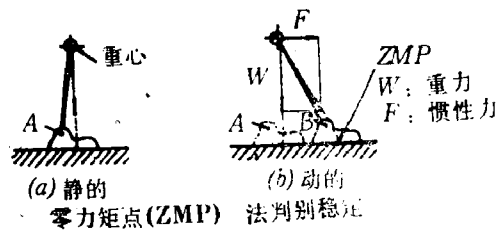


图7-46 稳定区域的建立

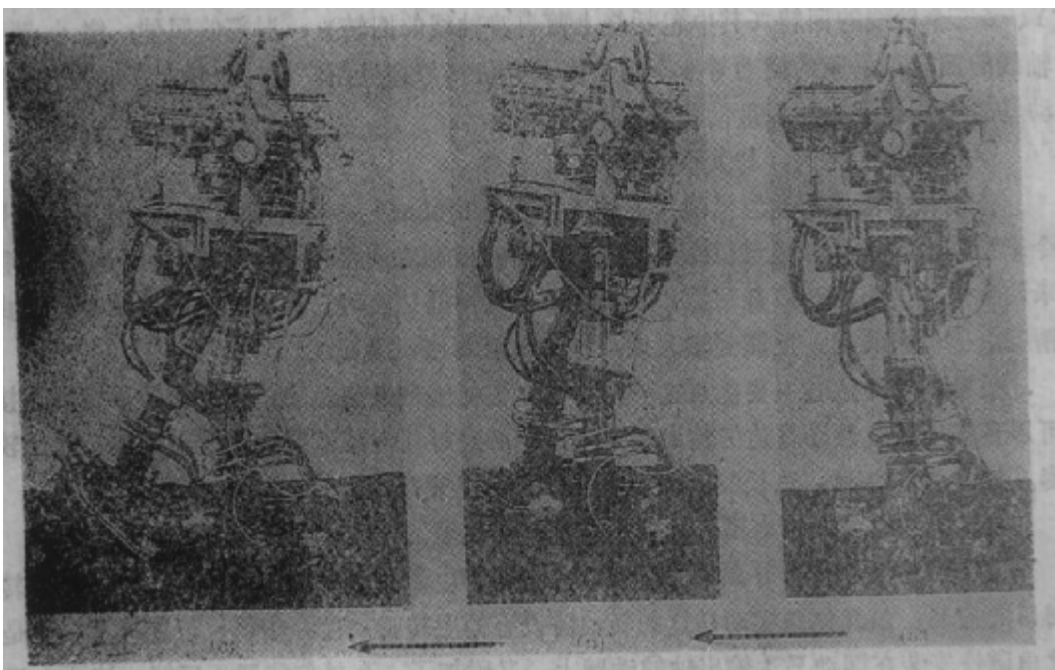


图7-47 二足步行机器人的行走状态

三 6自由度关节式液压伺服机械手的研制

该机械手是浙江大学流体传动与控制研究室研制的6自由度关节式液压伺服机械手。是以旋转油缸（液压摆动马达）直接驱动的，现将其研制结果概略地介绍如下。

1. 总体结构：

研制这种型式的液压伺服机械手，在国内尚属首次，除了反馈电位器外，而其它各种元器件都要自行研制。

为此，他们首先于82年底研制成功液压关节式机械手的关键性元件——液压伺服摆动马达，SB—1.6（双叶片）与SB—10（单叶片）两种基型经鉴定通过后，又研制了SB—16、SB—8、SB—2三种规格的摆动马达，以满足装配整手的需要。

为了提高整手的控制性能，他们改变了这种伺服摆动马达的传统控制方式，专门研制了DBED—035、DBED—030和DBED—025三种新型双向极化式比例电磁铁，作为伺服摆动马达的输入电-机械转换器。

此外还研制了内置油路的手臂，拟人型手掌及带校正板的八通道恒流型直流伺服放大器。

整手于85年5月鉴定通过，各项指标均达到或超过了原定设计要求。

该机械手运动机能的配置，基本类似人的手臂。它由不同规格的六台电液伺服摆动马达作为控制—驱动器，来实现上臂、小臂、手部的运动；上臂以肩为中心，绕X、Y、Z三个轴线的回转（其中包括绕上臂自身轴线的回转）；肘部的屈伸，绕小臂自身轴线的回转；手腕的摆动等6个自由度。其机构原理见图7-48。此外，还用一台伺服摆动马达来控制手指的抓取动作。

手臂的长度比例，与人手相仿。

该机械手由外部油源供油（工作压力 $P_s = 100\text{bar}$ ），各关节的运动分别由电信号指令来控制。输入信号经过恒流源伺服放大器，控制双向极化式电磁铁（力马达）的位移，来调节伺服转阀的阀口开启量，从而使液压摆动马达转动。摆动马达输出轴的转角由高精度电位器检测后，反馈到输入端，构成电液伺服位置系统。

采用摆动马达的主要优点之一是，由于它能实现低速运动，因此作为手臂用连接板可以直接安装在摆动马达的输出轴上，而不必经过任何减速装置，使整手的布置比较紧凑。整手总重29kg，总长985mm。其工作参数见表7-10。

此机械手的各个自由度，为典型的阀控马达型的电液位置伺服系统。

它的控制特点是采用直线位移的双向极化式电磁铁作为电-机械转换器，来实现转阀阀口的控制。虽然伺服摆动马达的转轴内设有伺服转阀，而存在单位位置反馈。但是，此电磁铁安装在摆动马达输出轴的动臂上，又附加了一个单位位置正反馈。这两个反馈互相抵消，从而最终消除了伺服转阀与摆动马达之间结构上存在的内部小闭环。为提高机械手在大惯量负载时的控制性能，提供了良好的条件。

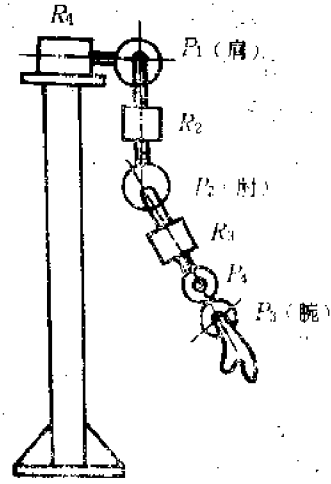


图7-48 机械手机构原理图

为了保证系统在大惯量负载时的稳定性和位置精度，在放大器内设置了校正环节。

表7-10 机械手各自由度的工作参数

数值 自由度	参数	排量 ml/rad	工作 角度	额定工作 压力 bar	理论 力矩 N·M	电磁铁 激磁电流 mA	自重 kg·f	臂长 mm
R ₁		16	±135°	100	160	800	4.5	上臂 300
P ₁		16	±135°	100	160	800	4.5	
R ₂		8	±135°	100	80	500	3.6	小臂 365
P ₂		8	±135°	100	80	500	3.6	
R ₃		2	±135°	100	20	300	1.2	手掌 210
P ₃		1.6	±50°	100	16	300	0.7	
抓握P ₄		1.6	±50°	100	16	300	0.7	

2. 液压伺服摆动马达

在液压驱动的有关式机器人中，关节通常采用一般的铰结构，而两臂间的相对摆动由直线往复运动液压缸来实现，因而结构比较庞杂，难以使臂具有类似人手的外型。

而这台有关式机械手中，均采用伺服摆动马达来直接构成各个关节（包括其它回转自由度），因此，关节的转动铰与动力驱动件合为一体，这就简化了布置，机械手的外形也相当简洁。

此摆动马达的转轴内尚设有旋转式伺服阀。因此，伺服控制阀与液压执行元件—摆动马达又成为一个有机的整体，只要控制旋转伺服阀的位置，就可以控制摆动马达输出轴的运动。这样，不但简化了结构，避免使用单独的、价格昂贵的电压伺服阀，并且，由于伺服转阀抗污染性好而提高了工作的可靠性。

此外，这种摆动马达还起到回转接头的作用，可以将液压油同时逐级输向机械手的各个液压执行元件。

图7-49是单叶片伺服摆动马达的结构原理图。它的转子叶片、固定叶片位于壳体与端盖所构成的工作腔中，液压油从壳体右侧引入后，经过轴套通向转子轴中的旋转伺服阀。阀芯工作部分的下部与压力油相通，上部与回油相通。当阀芯在比例电磁铁推动下转过一个角度时，阀口开启，压力油通向叶片一侧，而另一侧油腔则通过另一个阀口与回油口相连接。在液压力推动下，使叶片轴朝转阀旋转的方向转动。

由于比例电磁铁装在与摆动马达输出轴固定在一起的臂板上，所以只要输入的控制电流大小不变，阀芯的开口不会随输出轴的转动而变化。

轴的另一端装有高精度反馈电位器，以构成控制系统的闭环位置反馈。

图7-50所示是摆动马达的泄漏特性。

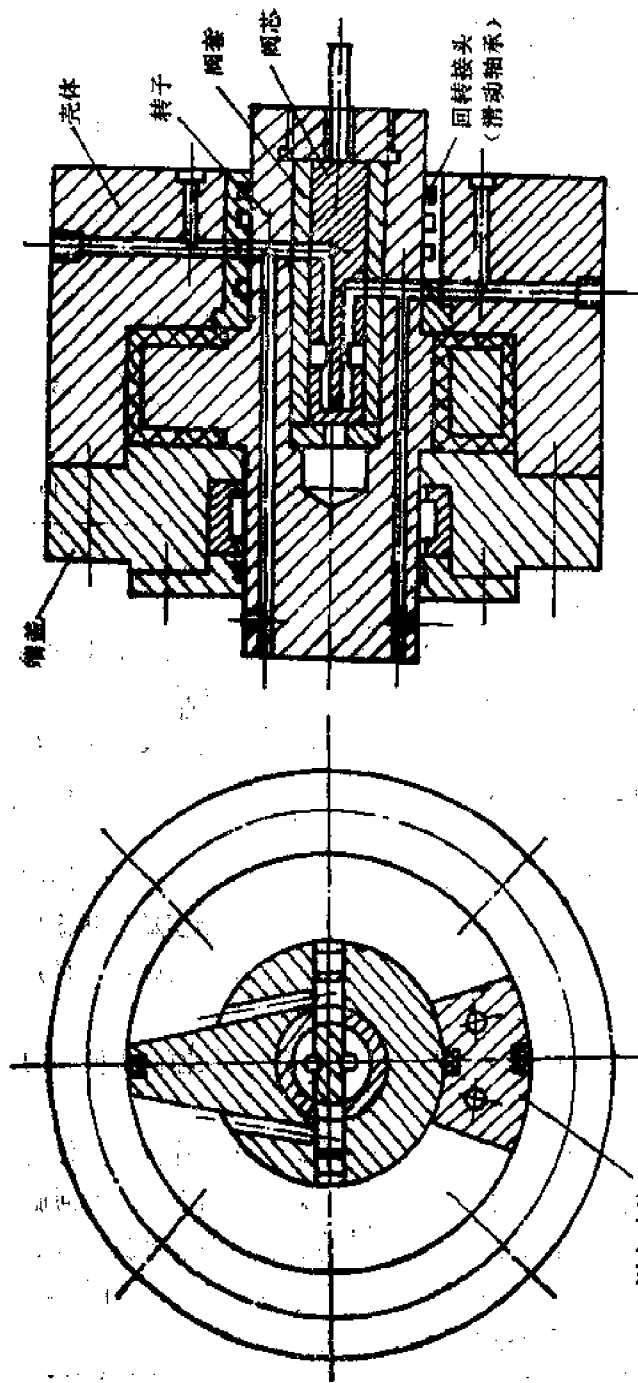


图7-40 伺服摆动马达示意图

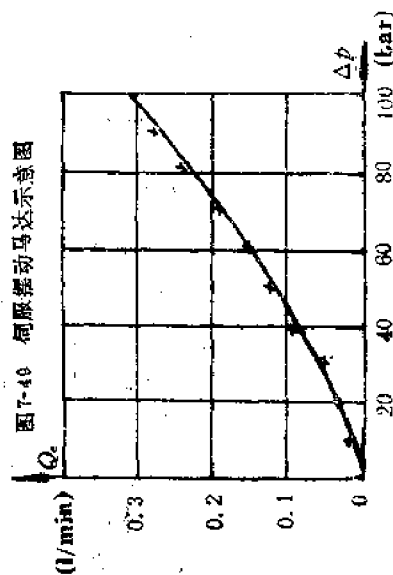


图7-50 摆动马达的泄漏特性

3. 双向极化式电磁铁

上述液压伺服摆动马达，可以用不同型式的电-机械转换器件来进行控制，一般采用微型直流伺服电机或步进电机。前者适用于模拟量控制的场合，但必须经过高速比减速后来驱动转阀；后者适用于脉冲量控制，其控制精度受步距角的限制，因而为了提高位置精度也常常需要减速器。由于上述两种控制器件的动态响应不够高(国产微型直流伺

服电机的频宽在 $2 \sim 3$ Hz以内), 所以难以保证机械手的工作性能。经过反复分析论证, 他们决定突破伺服摆动马达的习惯控制方式, 自行研制双向极化式电磁铁作为电-机械转换器, 以提高机械手的控制性能。

此双向极化式电磁铁结构简单, 工作可靠, 无零位死区, 滞回小, 线性度好, 动态特性优良。频宽在120Hz以上, 因此不会成为限制系统频宽的环节。

目前, 它已经扩展为耐高压双向比例电磁铁, 用于电液比例控制新技术的开发领域。

4. 臂

作为手臂的连接板, 不但是将各个摆动马达组合成完整的机械手的联接构件, 并且, 板中尚布置有油孔, 以传输液压油。因此, 整只手的外部没有任何油管, 这就能简化布置及美化外型。

手臂连接板必须使臂部在具有足够结构刚度的条件下, 尽量减轻重量, 并且保证各关节间的连接精度。为了在臂内设置油路, 经过不同结构型式的试验与对比, 虽然采用铣槽与盖板粘接的结构, 通油截面大, 有利于减小压力损失。但粘接剂的老化会影响使用性能, 因此, 在可以钻孔的情况下, 还是采用直接钻孔的臂部结构。

5. 手掌

为了使机械手具有类似人的形式, 手掌采用了五指关节式结构。

手指四杆机构的设计出发点是, 要使手指在抓握时运动轨迹与人手相似。为此, 首先经实测获得人手抓握时手指的运动轨迹图, 然后用最小二乘法在计算机上进行曲线拟合, 获得近似的函数表达式, 再用平面四杆机构的通用程序, 解得四杆机构的七个设计变量。

为了使手掌与人手相似, 控制抓取机构的伺服摆动马达必需布置在手腕之后, 用钢丝绳传动机构, 通过手腕摆动马达, 将抓取力传递到手掌。钢丝绳传动机构必须保证在手掌握紧物件后, 当手腕做 $\pm 50^\circ$ 摆动运动时, 不会使握紧力发生变化, 也就是说钢丝绳相对于手腕的长度要保持不变。

6. 整手性能的测试

整手装调完成后, 作了一系列性能测试。

(1) 位置精度的测试

测试方法是, 向被试关节的电液伺服摆动马达输入一固定电流, 用千分表测定手指处的位移重复精度。对肩、肘、腕三个关节各作十次测定, 在手指处位置重复偏差分别为 ± 0.70 mm, ± 0.5 mm和 ± 0.24 mm。

(2) 机械手关节转速的测试

试验时的输入信号是由信号发生器发出三角波信号, 通过校正放大器和电-机械转换器使摆动油缸摆动, 光线示波器从反馈电位器取出电压信号并记录, 该信号即为摆动油缸的摆角。再根据记录纸上的时标, 就可算出摆动油缸所达到的最高转速。

对肩、肘、腕三个关节进行测试, 得到最高转速分别为: 3.78 rad/s、 3.01 rad/s和 4.4 rad/s。

(3) 机械手瞬态响应的测试

瞬态试验的输入测试信号是由信号发生器发出阶跃信号，通过校正放大器，电-机械转换器，使机械手的伺服摆动油缸转动一个角度，反馈电位器与伺服摆动油缸输出轴直接相联，用光线示波器记录出反馈电位器电压的变化信号，该信号即为机械手各关节对阶跃信号的瞬态响应。

试验结果参见表7-11。表中 t_d ：延迟时间，响应曲线第一次达到稳定值一半所需时间。 t_r ：上升时间，响应曲线从稳态值的10%上升到稳态值的90%时所需时间（过阻尼系统）。 t_s ：调整时间，响应曲线达到并保持在稳态值的5%误差以内所需时间。

表7-11 机械手瞬态响应测试参数

	所采用油缸排量	t_d	t_r	t_s	备注
肩关节	16cc	0.6s	0.45s	0.2s	无超调，转角 $>20^\circ$
肘关节	8cc	0.2s	0.15s	0.1s	无超调，转角 $>20^\circ$
腕关节	16cc	0.2s	0.15s	0.1s	无超调，转角 $>20^\circ$

试验曲线，见图7-51与图7-52

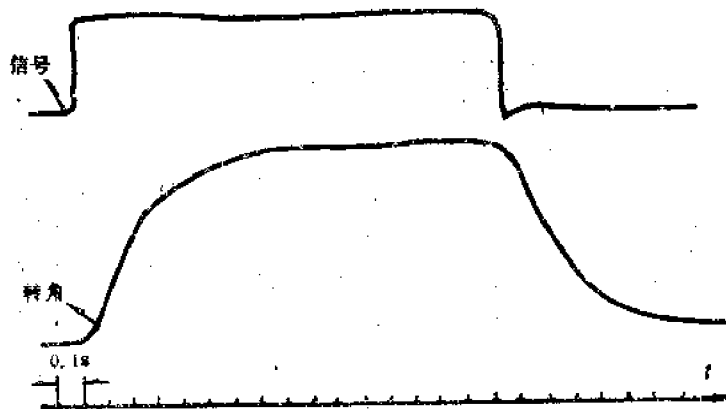


图7-51 肩关节瞬态响应曲线

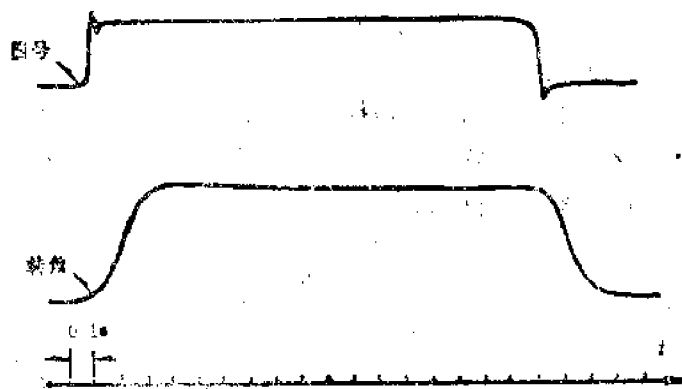


图7-52 腕关节瞬态响应曲线

(4) 机械手固有频率的测试

试验时，是由信号发生器发生信号，通过放大器，电-机械转换器，使电液伺服摆动油

缸摆动。用磁带记录仪记录下信号发生器和反馈电位器的信号，然后送到5240B信号分析仪进行分析，得到分析结果。

为了能准确的测出机械手的固有频率，在系统中拆除了系统校正部份。

试验条件：油压100bar，油温23℃，输入信号为连续脉冲信号，幅宽0.25s，幅高0.3V，肩关节无负载。为了消除随机干扰，减少分析误差，用5420B进行分析运算时，连续对40个脉冲及机械手响应进行分析运算后，取平均值得到最后结果。

试验结果的幅频曲线如图7-53所示。可以看出机械手肩关节的固有频率为9.4Hz。

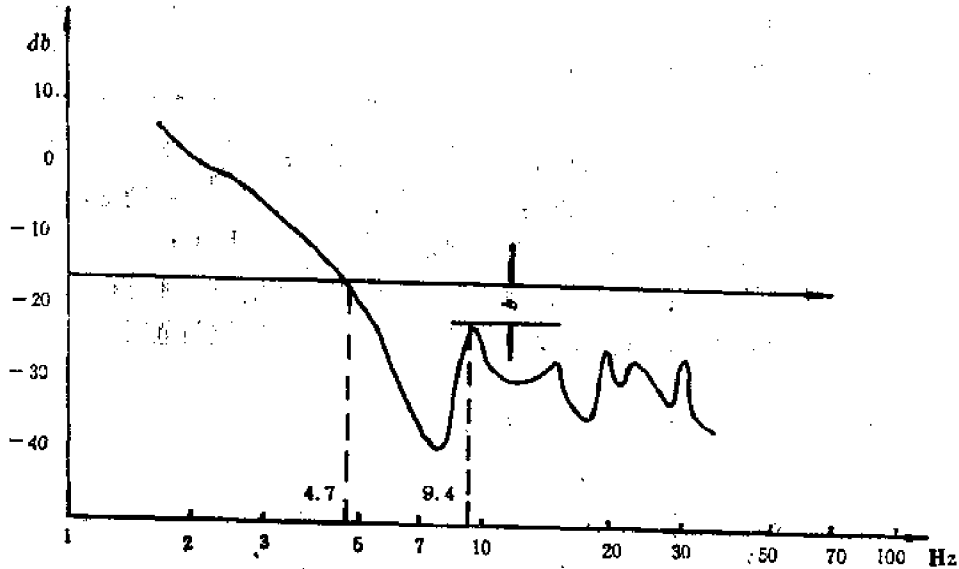


图7-53 肩关节伺服摆动油缸幅频特性实验曲线

§7-4 电液伺服系统的简易设计法

在这一节中所要介绍的简易电液伺服系统设计法是有关电液伺服系统设计的基础知识。对比较熟悉电液伺服系统设计者可作为初步估算电液伺服系统的静态与动态特性，经过初算之后，可以大致地选定电液控制系统的有关参数。如有必要也可参考有关电液控制系统的有关书籍进行较详细的分析与计算，但有时也无须再加精算，而是以此基本模型为基础通过各种补偿办法或近代控制理论的各种方法，使控制系统实现最佳或自适应的特性。而对电液伺服系统尚不太熟悉的人员，该简易法可以帮助设计者大致地确定电液伺服系统的各有关基础参数，以作为电液伺服系统设计及特性分析的基础和入门。

一 电液控制系统

应用伺服阀的控制系统，依应用方法不同有很多结构型式，但是在机器人中用得最多的是位置控制系统，其次则是力控制系统。

输入信号发生器和反馈检测元件由于控制系统的使用目的不同而不同，但其常用的

如表7-12所示。另外，按伺服阀的输出而操纵负载的执行机构有直线油缸、旋转型液压马达和摆动油缸等。

表7-12 信号发生器与反馈检测元件

输入信号发生器	反馈检测元件
电位计	电位计
自整角机	自整角机
程序控制器	差动变压器
数据记录仪	测速发电机
低频发信器	测力传感器
其它	压力传感器
	其它

二 电液控制系统的参数

为了更好地设计电液控制系统，必须清楚了解设计所必要的参数，必须事先定量地求得下述各参数的数值。

1. 有关控制性能的参数

(1) 是定值控制还是跟踪（连续）控制；

(2) 是连续控制时，其输出的时间函数是什么形式，波形、频率及振幅等；

(3) 最后输出与反馈输出是什么，位移控制、速度控制或力控制等；

(4) 需要响应速度的大小，频率特性的带宽或动态过程时间；

(5) 需要达到的精度，分辨率、稳态误差、干扰的影响及漂移等；

(6) 负载的最大速度、最大加速度、最大消耗功率及其控制范围等。

2. 负载条件

(1) 惯性质量（旋转型为转动惯量）；

(2) 弹簧负载时的弹簧刚度；

(3) 粘性负载时的粘性系数；

(4) 上述负载以外的外力，如摩擦力、重力等。

三 简易设计法的基础

当上述的各参数确定之后，就可大致地确定此控制系统的结构了，这时就可以画出组成系统的方框图。然后从功率的角度确定伺服阀的容量、执行元件尺寸的大小以及供油压力，根据这些数值讨论动特性、稳定性和依放大器 and 检测元件等确定精度。当然，若动特性和精度不能满足参数要求时，就要改变伺服阀、执行机构及供油压力等。

1. 选择伺服阀与执行机构

(1) 画负载曲线

首先以横轴表示负载力，纵轴表示负载速度画出负载的驱动曲线图。一般用不着画出对所有范围的驱动状态，但是至少要求出最大负载力点、最大速度点和最大功率三个点。

例如，当求只有惯性负载其质量为 m 公斤，以一定振幅一定周期进行正弦波驱动时的负载曲线。因负载的位移是正弦运动，所以其位移为

$$x = a \sin \omega t \quad (7-72)$$

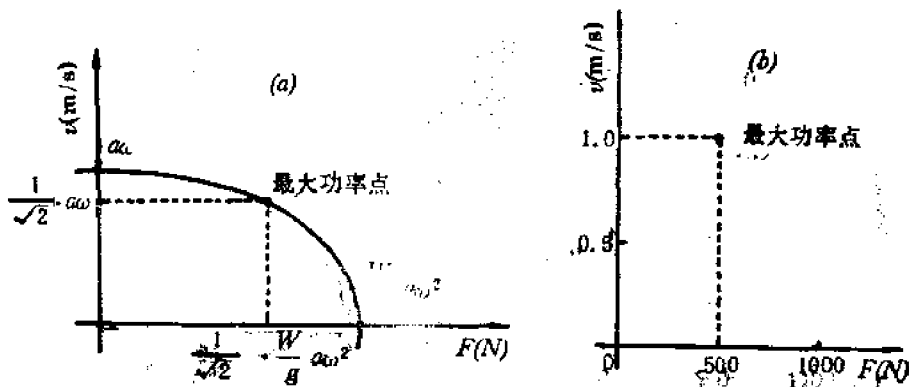
所以负载速度 v 与负载力 F 可用下式表示，

$$\left. \begin{aligned} \text{速度} \quad v &= a \omega \cos \omega t \\ \text{负载力} \quad F &= -m a \omega^2 \sin \omega t \end{aligned} \right\} \quad (7-73)$$

因此由式 (7-73) 消去 t , 则负载力 F 与负载速度 v 的关系如下:

$$\frac{F^2}{(m a \omega^2)^2} + \frac{v^2}{(g \omega)^2} = 1 \quad (7-74)$$

其负载曲线如图7-54(a)所示, 是四分之一椭圆 (只表示第1象限)。



(a) 惯性负载的正弦波驱动 (b) 最大功率点的情况

图7-54 负载曲线图

当只有摩擦力负载而且最大速度已知时, 如图7-54(b)所示, 不论是上述哪种情况, 负载的最大消耗功率都是由 $F \cdot v$ 的最大值求出。

(2) 伺服阀的压力

伺服阀的输出功率是伺服阀的负载压力与输出流量的乘积。伺服阀的负载压力与输出流量的关系式如下:

$$q = K i \sqrt{|p_s - p_l|} \quad (7-75)$$

式中 q 是输出流量; i 是输入电流; p_s 是供油压力; p_l 是负载压力 ($p_l = p_1 - p_2$); K 是伺服阀的有关常数。如将公式 (7-75) 用纵轴为流量横轴为负载压力的曲线表示时, 则如图7-55所示的抛物线形曲线 (伺服阀最大输入时的负载压力-流量特性)。因此, 由上述分析可知, 输出功率 U 为最大的条件如下。即为图7-55的 p 点。

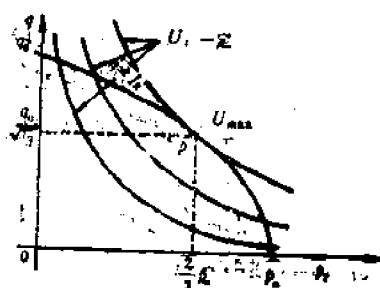


图7-55 伺服阀的负载压力-流量特性曲线

$$i = I_R \quad (I_R \text{ 为额定电流})$$

$$p_l = \frac{2}{3} p_s$$

$$q = \frac{1}{\sqrt{3}} q_0 \quad (q_0 \text{ 为无负载最大流量})$$

$$(7-76)$$

此时的最大功率 U_{max} 以下式表示:

$$U_{max} = \frac{2}{3\sqrt{3}} p_s q_0 \quad (7-77)$$

(3) 执行机构

执行机构中有直线形与旋转形，它们都是把伺服阀输出流量 q 和负载压力 p_l 分别变成机械量的速度 v 或角速度 ω 以及力 F 或力矩 τ ，如果忽略油的泄漏、压缩性和摩擦，则其变换关系如下：

$$\left. \begin{aligned} \text{直线油缸} \quad v &= \frac{q}{A}, \quad F = Ap_l \\ \text{旋转油马达} \quad \omega &= \frac{q}{ND}, \quad \tau = NDp_l \end{aligned} \right\} (7-78)$$

式中 A 是油缸的有效面积， N 是油马达与负载间的减速比， D 是油马达的排量 (cm^3/rad)。

(4) 伺服阀与执行机构的选择

用式 (7-78) 将伺服阀的负载压力-流量特性曲线的坐标可变成负载曲线 ($F \sim v$) 的坐标。即把伺服阀的输出特性 ($p_l \sim q$) 经变换后可画在 ($F \sim v$) 曲线的同一坐标内。从功率的角度选择伺服阀与执行机构就是伺服阀的输出特性图应从外侧包围负载曲线。负载曲线上伺服阀的输出特性图，随着供油压力的大小、伺服阀的流量及执行机构大小 (油缸面积) 的变化而改变形状。

① 增加供油压力则抛物线向右平行移动 (图7-56(a))。

② 伺服阀的流量增大，则顶点不动抛物线向上方扩展 (同图(b))。

③ 当油缸的有效面积、油压马达排量及减速比增大时，顶点右移，而最大输出功率不变，则抛物线变窄 (同图(c))。

所以可根据负载条件确定上述三个数值。一般先求出负载的最大功率 U' ，然后将它上移求出具有最大输出功率的伺服阀与供油压力的组合，最后适当选出执行机构的大小，这时就能驱动负载。

另外从效率的观点出发，使负载的最大消耗功率点与伺服阀的最大输出功率点一致就可以了。

2. 组成环节的动特性分析

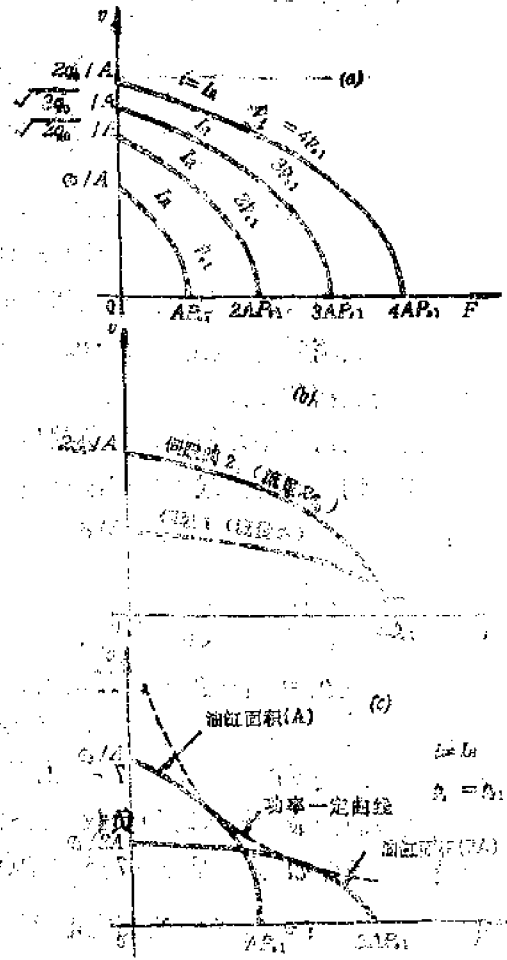


图7-56 不同设计条件时伺服阀输出特性的变化

- (a) 供油压力变化 (b) 伺服阀流量变化
(c) 执行机构大小变化

在分析电液控制系统动特性时，与其它控制系统是一样的，各组成环节的传递函数可通过理论分析求出和实验求出，画出开环波德图之后分析闭环的动特性和稳定性。下面分析如图7-57所示的简单控制系统。

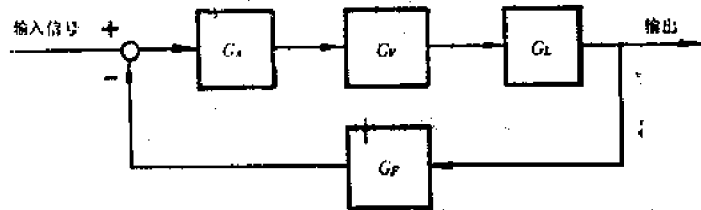


图7-57 控制系统的方框图

图7-57中 G_F 一般情况下是常数， G_V 表示伺服阀的流量增益与频率特性。 G_A 是伺服放大器的特性，是可以进行增益调节的。伺服阀与伺服放大器的特性可以从产品样本中查得。下面以求滑阀到油缸输出位移的特性 G_L 为例进行一般的讨论。

(1) 执行机构为直线运动油缸的情况

当负载是惯性、弹性及粘性负载时，直线运动油缸位移控制的情况，在下面某一点附近进行线性化。

当工作点如图7-58所示的点时，则伺服阀滑阀输出特性可用下式表示：

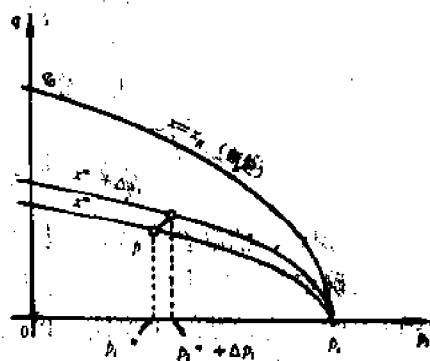


图7-58 伺服阀滑阀特性的线性近似

$$A \frac{d}{dt}(\Delta y) = k_1 \Delta x - k_2 \Delta p_1 - \frac{\beta V}{2} \frac{d}{dt}(\Delta p_1) \quad (7-79)$$

式中 A 为油缸的有限断面积； V 是活塞位于油缸中间时油缸单侧的容积（如忽略管路容积则为 $\frac{1}{2}AL$ ，其中 L 是油缸的全行程）， β 是油的压缩率， Δy 是由油缸中点开始的微小位移，而

$$k_1 = \left| \frac{\partial q}{\partial x} \right|_{x=x^*}$$

$$k_2 = \left| \frac{\partial q}{\partial p_1} \right|_{p_1=p_1^*}$$

另外，负载的运动方程式如下：

$$A \Delta p_1 = m \frac{d^2}{dt^2}(\Delta y) + B \frac{d}{dt}(\Delta y) + k \Delta y \quad (7-80)$$

式中 m 为负载质量； B 为负载的粘性系数， K 为负载的弹簧刚度；负载压力 $p_1 = p_1 - p_0$ 。

由式(7-79)、(7-80)消去 Δp_1 ，如取 Δx 、 Δy 的拉氏变换分别为 ΔX 、 ΔY ，
 可得由滑阀位移到输出位移的传递函数 $G_L(s)$

$$G_L(s) = \frac{\Delta Y}{\Delta X}(s) = \frac{k_1}{As + \frac{1}{A} \left(k_2 + \frac{\beta V}{2}s \right) (ms^2 + Bs + K)} \quad (7-81)$$

式中 s 为拉普拉斯算子。

式(7-81)是3阶系统，但是实际中，由于参数与负载条件不同，有时是可以简化的。

① 负载只为惯性负载的情况 ($B=0, K=0$)

$$G_L(s) = \frac{\frac{k_1}{A}}{s \left(\frac{m\beta V}{2A^2} s^2 + \frac{mk_2}{A^2} s + 1 \right)} \quad (7-82)$$

这时，由于工作油的压缩性的等价弹簧和由惯性质量引起的共振频率 ω_n 为

$$\omega_n = \sqrt{\frac{2A^2}{m\beta V}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{1}{\beta}} \cdot \sqrt{\frac{A}{Lm}} \quad (7-83)$$

ω_n 可由油缸面积 A 、油缸全行程 L 、负载质量 M 和工作油的压缩率 β 求出来。

当按上述确定的油缸有效断面 A 、油缸全行程 L 求出 ω_n ，如果 ω_n 为系统所必要的带宽的5倍以上时，这时油的压缩性可以忽略，其情况将与(b)相同。但是当 ω_n 与系统必要的带宽相近时，将引起不稳定，如在稳定范围内使用时系统的带宽要变窄，这时快速性与精度特性都要下降。这时必须通过模型实验与计算机分析等详细探讨才行。

② 只为惯性负载且可忽略油的压缩性的情况 ($\beta=0, B=0, K=0$)

$$G_L(s) = \frac{\frac{k_1}{A}}{s(T_1s + 1)} \quad (7-84)$$

时间常数可按下式求得

$$T_1 = \frac{mk_2}{A^2} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{mq_0}{A^2 p_0} \quad (7-85)$$

式中

$$k_2 = \left. \frac{\partial q}{\partial p_1} \right|_{p_1 = \frac{\sqrt{3}}{2} p_0} = \frac{\sqrt{3} q_0}{2 p_0} \quad (\text{最大输出功率点})$$

这时，伺服阀滑阀控制节流口对于负载作为粘性阻力工作的效果加大，这时的时间常数可通过油缸面积 A 、负载质量 M 、供给伺服阀的压力 p_0 以及这时的无负载最大流量 q_0 求出。如这时由 T_1 确定的一阶惯性系统的交接频率 ($\omega_1 = 1/T_1$) 与系统整体的带宽相比不太高时，这就要注意相位迟后或增益衰减对系统的影响。

③ 只有弹性负载的情况 ($\beta=0, B=0, m=0$)

$$G_L(s) = \frac{Ak_1}{Kk_2} \cdot \frac{1}{T_2s+1} \quad (7-86)$$

时间常数

$$T_2 = \frac{A^2}{k_1K} = 2 \cdot \frac{p_0}{q_0} \cdot \frac{A^2}{K} \quad (7-87)$$

式中

$$k_2 = \left. \frac{\partial q}{\partial p_1} \right|_{x=0, \dots} = \frac{q_0}{2p_0}$$

这时时间常数 T_2 也是由 A 、 K 、 p_0 与 q_0 求出。此时由 T_2 确定的系统交接频率($\omega_2 = 1/T_2$)与(b)的情况不同,因为这时是表示系统不具有积分特性,对确定开环系统的开环增益或控制精度(稳态误差)等有影响,因此当 ω_2 比系统带宽高得不能忽略时必须进行详细地分析。

(2) 执行机构为油马达的情况

当机器人为直接驱动时在各关节处装有油马达或旋转油缸。当负载为惯性与粘性负载时,求伺服阀滑阀到油马达输出角位移的特性时,如有减速齿轮机构则要把负载换算到马达轴上再计算。

设伺服阀的输出流量为 q 、负载压力为 $p_i = p_1 = p_2$ 时,马达的速度为 ω 输出力矩为 τ 间的关系式如下(此处假定是无摩擦与内泄漏的马达。实际上可把这些值换算到负载上或伺服阀特性上)。

$$\omega = \frac{q}{D}, \quad \tau = Dp_i \quad (7-88)$$

式中, D 是油马达的排量(cm^3/rad)。

如工作点取图7-58的 p 点,则伺服阀滑阀的输出特性可用下式表示:

$$D \frac{d}{dt}(\Delta\theta) = k_1 \Delta x - k_2 \Delta p_i - \frac{\beta V_c}{2} \cdot \frac{d}{dt}(\Delta p_i) \quad (7-89)$$

式中 β 是工作油的压缩率($1/\text{Pa}$);

V_c 是伺服阀与油马达间的管路容积和单侧油马达内油的容积之和;

$$k_1 = \left. \frac{\partial q}{\partial x} \right|_{x=0, \dots} \text{是伺服阀的流量增益;}$$

$$k_2 = \left. \frac{\partial q}{\partial p_i} \right|_{x=0, \dots} \text{是伺服阀相对负载压力的流量增益;}$$

$\Delta\theta$ 是油马达的微小角位移(rad)。

其负载的运动方程式如下:

$$D \Delta p_i = (J_L + J_m) \frac{d^2}{dt^2}(\Delta\theta) + (B_L + B_m) \frac{d}{dt}(\Delta\theta) \quad (7-90)$$

式中 J_L 是换算在马达轴上的转动惯量； J_m 是马达本身的转动惯量； B_L 是负载的粘性摩擦系数； B_m 是马达本身的粘性系数。

由式(7-89)与(7-90)可求出滑阀位移到马达输出转角的传递函数 $G_L(s)$ 。

$$G_L(s) = \frac{\theta}{X}(s) = \frac{k_1}{Ds + \frac{1}{D}\left(k_2 + \frac{\beta V_c}{2}\right)(J_m s^2 + B_m s)} \quad (7-91)$$

式中 s 是拉氏变换算子， $J_m = J_L + J_m$ ， $B_m = B_L + B_m$ 。

上式是3阶系统，但实际上由于参数与负载的不同，计算下面两种情况后，研究那个影响大，就可得出设计的粗略结果。

① 计算由压缩性引起的液压弹簧与负载转动惯量引起的共振频率

由式(7-91)，当 $B_m = 0$ 时，则 $G_L(s)$ 变成下式：

$$G_L(s) = \frac{\frac{k_1}{D}}{s\left(\frac{J_m \beta V_c}{2D^2} s^2 + \frac{J_m k_2}{D^2} s + 1\right)} \quad (7-92)$$

此传递函数的开环幅频特性(波德图)为如图7-59所示的形式，其共振频率 ω_n 为

$$\omega_n = \sqrt{\frac{2D^2}{J_m \beta V_c}} \quad (7-93)$$

式中 V_c 是伺服阀与油马达间油容积的1/2。

当此 ω_n 为控制系统带宽的5倍以上时，则式(7-92)可看成简单的积分环节。但是当 ω_n 与系统带宽相接近时，这时不能提高滑阀增益，所以得不到必要的带宽，而且快速性与精度特性下降。这时，相对负载条件要求的参数较严苛，有时要进行详细的分析讨论，即采用模型实验或计算机分析等。

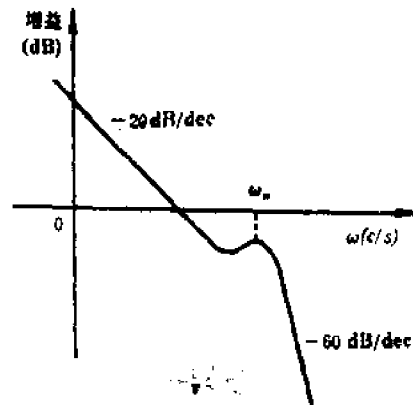


图7-59 阀控马达的波德图

② 共振频率高，油压缩性影响小的情况如式(7-92)中 $\beta = 0$ ， $B_m = 0$ 时

$$G_L(s) = \frac{\frac{k_1}{D}}{s\left(\frac{k_2 J_m}{D^2} s + 1\right)} \quad (7-94)$$

此传递函数的频率特性形式与前者稍有不同，这时交接点的时间常数 T_1 为

$$T_1 = \frac{k_2 J_m}{D^2} \quad (7-95)$$

式中

$$k_2 = \left| \frac{\partial q}{\partial p_1} \right|_{p_1 = \frac{2}{3} p_0} = \frac{\sqrt{3} q_0}{2 p_1} \quad (7-96)$$

式中 p 是供油压力, q_0 是阀压降 p 时的无负载最大流量。

如若交接频率 $\omega_1 (= 1/T_1)$ 与系统带宽相比不太高时就不能当成简单积分环节处理, 这是要特别注意的。

3. 闭环控制系统的特性分析

若 ω_c 与 $\omega_1 (= 1/T_1)$ 与系统的带宽相比很高时则 ω_c 与 ω_1 可以忽略, 而且可看成 $\omega_2 (= 1/T_2)$ 等于零, 这时执行机构的负载特性 $G_L(s)$ 可用简单的积分环节表示, 在伺服阀、伺服放大器及反馈检测器的传递函数可看成为常数的频率范围内, 则图7-57所示的开环传递函数可用下式表示:

$$G_L(s) = \frac{K_I}{s} \quad (7-97)$$

开环增益 K_I 为

$$K_I = K_A \cdot K_V \cdot K_L \cdot K_F \quad (7-98)$$

式中 K_A 是伺服放大器电流增益 (输出电流/输入电压); K_V 是伺服阀的流量增益 (输出流量/输入电流); K_L 是执行机构增益 (输出速度/输入流量或为油缸面积的倒数); K_F 是反馈检测元件的增益。

这时的闭环传递函数 $\phi(s)$ 如下:

$$\phi(s) = \frac{1}{\frac{K_I}{K_F} s + 1} \quad (7-99)$$

闭环带宽 ω_c 为

$$\omega_c \approx K_I \quad (7-100)$$

因此, K_I 越大, 系统的带宽越宽, 所以其精度也提高。但如若 K_I 达到某一数值以上时, 在上述看成常数的 $G_V(s)$, $G_L(s)$ 和 $G_A(s)$ 中出现相位迟后或共振现象, 这时系统将变为不稳定。这时上述传递函数就不能看成是常数, 要把各个传递函数在波德图上相加后求出开环传递函数, 然后再求出系统的闭环动特性与稳定性。

4. 精度分析 (油缸的情况)

(1) 由伺服阀、伺服放大器的漂移所引起的位置误差

如果系统的开环特性以式 (7-97) 表示时, 则稳态位置误差为零, 但伺服阀与伺服放大器的漂移却引起输出的位置静差。

现假定伺服阀和放大器的漂移 (零点漂移、滞环、死区) 换算成伺服阀输入电流为 ΔI 时则油缸输出的位置静差为 (见图7-60):

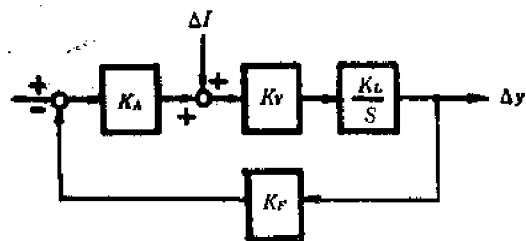


图7-60 伺服阀与放大器零漂引起位置误差

$$|\Delta y| = \frac{|\Delta I|}{K_A K_F} = \frac{|\Delta I|}{I_R} \cdot \frac{I_R K_V K_F}{K_I} = \frac{|\Delta I|}{I_R} \cdot \frac{v_{\max}}{K_I} \quad (7-101)$$

式中 v_{\max} 是由伺服阀、油缸有效面积确定的油缸最大速度。

因此，若知道开环增益 K_I 、油缸的最大速度 v_{\max} 和比值 $|\Delta I|/I_R$ （一般在5~10%左右）三个数值后就可求出由漂移引起的油缸输出的位置静差。

(2) 由外负载力引起的位置误差

如以伺服系统进行位置控制时，对执行机构加入外负载力时要产生位置误差。如假定负载力为 F_0 ，则平衡此负载力的负载压力为 p_{l_0} ，

$$p_{l_0} = \frac{F_0}{A} \quad (7-102)$$

伺服阀为了产生此负载压力需要输入电流 ΔI_0 。此 ΔI_0 由伺服阀的零点压力增益确定，若零点压力增益为 k_s 时，则 ΔI_0 可按式求出：

$$\Delta I_0 = \frac{p_{l_0}}{k_s} \quad (7-103)$$

式中

$$k_s = \left. \frac{\partial p_l}{\partial i} \right|_{i=0}$$

由 ΔI_0 可按上述方法求出 Δy_0 。

(3) 常速度输入时的位置误差

如对图7-57所示系统加入常速度输入信号时，要产生稳态误差 Δy_D ，当输出速度为 v' 时，

$$\Delta y_D = \frac{v'}{K_I} \quad (7-104)$$

(4) 影响精度的其它因素

上述的三种位置误差，不论哪一种情况都与开环增益有关，但是与开环增益无关的是反馈检测元件的分辨率。即位置传感器的固有误差、调整和校准误差等，它所引起的系统误差与开环增益无关。因此为了提高控制系统的精度，不仅要研究控制系统，而反馈传感器的选择是十分重要的。

以上介绍的电液伺服系统简易设计法对选择电液驱动部分各元件参数是很有用的，当各组成元件的参数确定后，为了进行更精确的分析就要应用控制理论的有关知识进行较详细的分析和实验，以便准确地掌握所设计控制系统的静态与动态特性。

第八章 机器人的应用系统

§ 8-1 工厂生产

一、生产系统的自动化

到目前为止，生产设备自动化多半是以品种少或大批量生产为对象的。如汽车或马达等的大批量生产，还有电视机和收音机等家用电器产品也是一样。

但是，自动化的目标也不不断扩大到多品种的中小批生产，为了满足消费者对产品多样性的要求，最近几年，各国都开始研制叫做FMS（柔性生产系统）的具有通用性的生产系统。

在过去，这种通用性不是由机械而是由操作的人来实现的，现在这种通用性要由机械或生产系统来完成。

在此FMS热的促使下，日本在1973~1975年对无人化工厂进行了一次调查，此调查结果在日本国内外起了极大的反响。此后，有各种FMS考查团访问日本。在此调查的基础上由1977年到1983年的7年计划以130亿日元的预算，通商产业省工业技术院开始了「应用超高性能激光柔性生产系统」的大型研究计划。这一计划是向无人化工厂迈进的第一步，它着眼于多品种小批量生产系统，其目标就是FMS。

与以前相比各国对FMS的重要性都已有所认识，特别是渡过了第一次石油危机的日本生产力与自动化技术力量得到了发展，而欧美的有关技术工作者对日本这一事实非常敏感，也纷纷开始发表了有关FMS的计划。在此FMS中，作为自动化的搬运手段之一，具有通用性的移动式机器人突然开始被人们重视起来。

二、FMS与移动式机器人

以前，自动化设备中的搬运手段用得最多的是传送带。例如汽车装配线和机械式手表的装配线都是这种传送带或与传送带类似的吊式移动装置。而简单的挑选与装配用机器人只是连接此传送带与加工机床间的一种手段。这种传送带系统，自福特T₂型汽车生产线使用以后，已经有很长的历史了。它技术上已经很成熟，特点是能够准确地完成任务，从效率的观点来看，是一种适合大批量生产的方法。但是它占面积较大，改造生产线困难，对于多品种生产是不适合的。除了用途单一这一缺点之外，还存在着噪声、振动及不美观等问题。

对上述的噪声、振动及不美观等劳动环境问题，有些国家并不重视，但对工人劳动意识低下的欧美来说，却是个很大的问题。

在意大利的费亚特工厂，搬运车在车间内到处转游，工场就象游乐场一样，其气氛很使人愉快。

自1979年到1980年陆续发表了用自动搬运车的FMS系统。当时费亚特工厂已实现了FMS化，此外还有美国的新西纳契·米拉库仑工厂，西德、日本的富士通的富士工厂及村田机械厂等。

当然，搬运用的移动车在FMS以前也使用得很多。在日本的很多工厂都生产自动搬运车。但是多数都是在地板下敷设诱导电缆的一种型式。

三、FMS的模型

美国最大的机床厂新西纳契·米拉库仑生产的多关节机器人是很有名的。这个工厂为了把FMS的概况和特点表示出来，制成了一个最小的模型系统，叫做VMMS(多目的生产系统)，曾经展出过。

图8-1就是VMMS系统的简单结构图。这是由进行机械加工的机床与供给和搬运加工件及工具的机器人相结合而实现加工搬运的高度自动化系统。

此系统与外部的接点，是如图中以D表示的装料卸料工位。在此处向系统内供给加工前的被加工件与新的工具或将加工后的工件及磨损的工具，由此搬到系统外部。

在送到此工位之前事先要把被加工件用夹具固定在托板上，把工具放在机架内。此工位为门形结构。如把托板或机架装在此门形结构的上半部，而移动机器人C从它的下面进来把它抓住并拿走。

因此在移动机器人中，除了移动机能之外，还具有使装载物托板与机架着脱的连接部上下移动的机能。

此移动机器人的结构如图8-2所示。是由小脚轮与两个驱动轮构成的两轮独立驱动型的结构，是以电池为电源，上下的移动为液压驱动的。

通过此移动机器人C搬到系统内的工件或工具是按托架上的卡片番号，搬运到目标

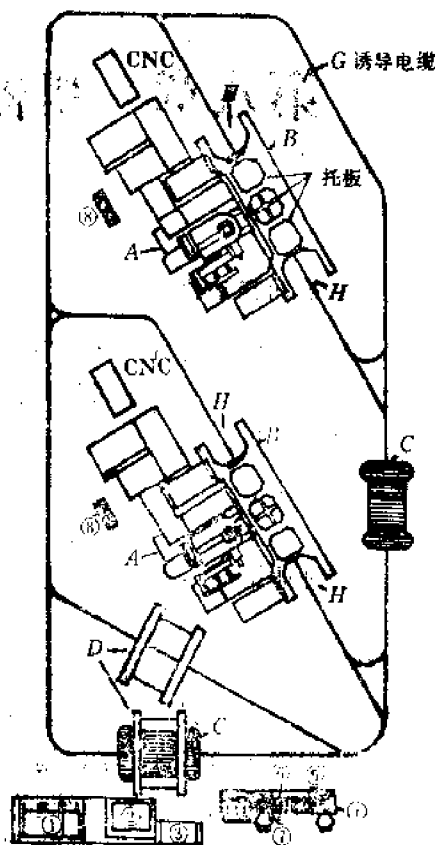


图8-1 VMMS系统
①~⑦ 微机与显示系统
⑧ 移动车的范围控制器

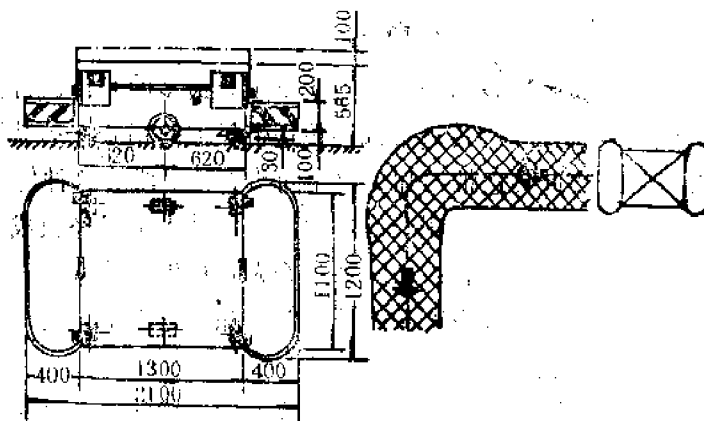


图8-2 VMMS中使用的移动机器人的结构与曲线行走

点NC机床的A处，然后把工件放到工位B上去。即以移动机器人搬运的工件托架和工具机架一旦放入工件工位的接收部H，在H到B的移动途中调整位置之后，实际进行加工的机床就可高精度地装卡工件与必要的工具了。

加工完了的工件及磨损的工具按上述相反的顺序进行，搬运到点D之后，送到系统外部去。这一系列动作都是自动完成的。因此，人的工作只是在D处装设托板与机架，同时把卡片番号存入整个控制装置的两个作业。

这样的模型系统中，H有4处、D有2处及移动机器人C2台上有2处，总计有8处可以放托板与机架，但是若8处都占满时，搬运与交换就无法进行了，所以此系统中托板与机架最多只能同时有7个存在。

这种FMS系统与以前的固定生产线相比，有很大的通用性，其中仅移动机器人的搬运系统就有以下的优点。

(1) 对多品种生产，由于工件种类不同，其加工时间也各异，在很多机床中有忙有闲。移动机器人可以寻找闲着的机床把工件搬给它，从而可使高价加工系统的使用率得到提高。

(2) 搬运线的设置、扩大及变更容易。

(3) 机床的增设与撤掉容易。

(4) 由于工具也可以搬送，所以比以前的加工中心机能增多了。

(5) 由于搬运路径可自由选择，所以可选出最佳路径。

§ 8-2 宇宙开发

一、未来的“宇宙工厂”

银河系平均约有1千亿颗星，而宇宙中象银河系的星系约有1千亿个。因此有人猜测从概率的角度看，除了地球之外，总应该还有充满生命的星球。因此人们期望有一天能实现与宇宙人通讯与交流，所以欧美有些国家投入大量的预算，建立了庞大的与异星人通讯的研究计划。还有的人抱着即使没有宇宙人存在，而利用与地球不同的特异环境去发展宇宙工业的想法去开发宇宙。日本就是这样，在1980年3月发表的「80年代通产政策设想」中，就指出了要发展的宇宙工业有光电子工业、半导体、航空、生命科学等。通商产业省以4亿日元的投资发展宇宙工业，作为日本将来的战略工业加以培植。而作为宇宙先进国之一的美国在1982年开始制定向太空发射航天飞机计划。这就意味着以超高真空、无重力及温度极低的宇宙空间为特征的「宇宙工厂」的出现。例如希望在此「宇宙工厂」中进行镓、铯等革新的电子材料的制造以及其它各种实验。

但是，作为把宇宙工厂放在它内部并且能作为宇宙探测基地的宇宙空间站，必须是把航天飞机运去的部件经过组装而建成。这是在宇宙中的建筑作业，必须有类似由人操纵的主从式机械手才能完成。

在宇宙空间站的两侧象翅膀一样伸出两个装有大量太阳能电池的横梁，其长度为500~800m，重量为1.6~4.5T，其结构是相当庞大的。操作它用的带机械手的起重机

其长度计划为90m左右。

下面简略介绍在宇宙空间进行大规模作业中所用的双向机械手与装有该机械手的有人宇宙空间站的设想图。

二、有人遥控作业站(MRWS)

据美国宇航局(NASA)约翰逊宇宙中心的计划表明,宇宙空间站及其它装配作业中,使用装有两只手的机械手和一个稳定器的操纵室,把它叫做有人遥控作业站。

首先是在地面进行模拟,以试验研究组成系统的关键元件,从而得到设计参数。此模拟程序由约翰逊宇宙中心内的机械手研究设备进行,此处设有 $17 \times 27\text{m}$ 的气动轴承的平台与 15m 长的液压驱动的机械手,进行宇航遥控机械手系统的模拟试验。

有人遥控作业站,首先是预备用作支持航天飞机操作的,在上述遥控作业站的端部准备装设有开式操纵室的起重机。即作为人造卫星的服务用平台,还准备用于空间摩擦实验时的配置收纳以及安装巨大宇宙物等。

由1980年中期到后期预定实现使用MRWS的几个计划。首先,在开始建造基地时,使用MRWS安装巨大的天线与太阳能的有关部件。开式操纵室的起重机也是在初期阶段使用,但是为了提高生产率和保证乘务人员的坐舱环境及安全,要求用闭式操纵室。

在美国宇航局有关MRWS的计划中,除了开式操纵室的起重机外,都是单人操纵室起重机。由此可见,MRWS除了进行装卸及安装等作业外,还可以设想进行建设基地的一般维护、修复及检查等工作。

MRWS的最重要作用是在建设太阳能卫星的工作中使用。这时,MRWS起重机转台与起重机要与有人飞船、控制中心操纵室及轨道作业船协调工作。在进行摆放很多太阳能电池的巨大横梁作业时,要确定 816m 长横梁的定位,使其都在一条线上后进行安装等作业。

三、宇宙作业用双向机械手

如上所述,有人遥控作业站中使用常压加压闭式操纵室的起重机。图8-3就是此起重机的外观图,其上装有2个力反馈形双向机械手与1个用于稳定的把持装置。从动机械手的长度为 2m ,操纵室中的机械手长度为 36cm 。由实验得知,如采用力反馈形双向机械手,人在适合的环境中,即在操纵室中同样可得到与穿着笨拙的宇宙服相比具有同样的生产率。

此闭式操纵室起重机(CCP)直径为 1.7m ,高为 2.5m ,内部体积为 2.8m^3 ,内压为 1.03 大气压,内部温度为 $24 \sim 30^\circ\text{C}$,

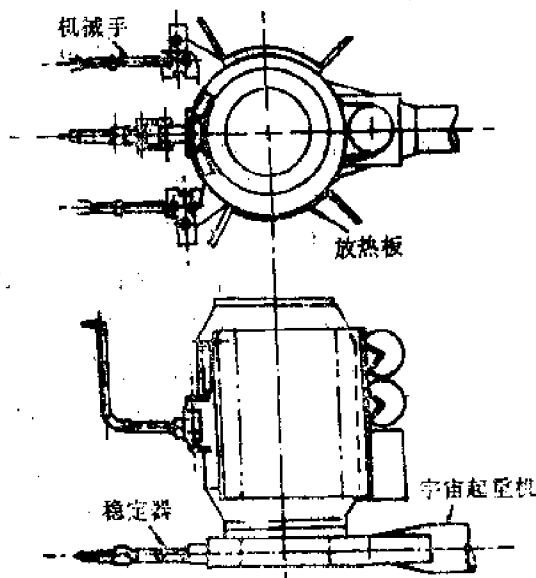


图8-3 闭式操纵室起重机的外观图

的建造、维护及其它成本有非常大的影响，所以必须做得很小。因此，放在其中的主动机械手也尽可能小型化。

图8-5是经小型化努力结果设计的主动机械手设计图。臂长是从动机械手的三分之一，这仍然受操纵室大小的制约，尚不能包括从动的全部范围。因此，不使主动与从动在全部动作范围内达到1:1的对应关系，而是必须把从动的活动范围分成几个区域轮换地进行。原子能反应堆用的机械手也采取与此类似的技术。

另外，在实际进行双向动作时，必须适当地选择各种控制状态。这种控制状态的选择，是通过地面实验确定的，与此同时，通过模拟实验，机械手的形状也可能发生很大的变化。

此外还有无重力影响与散热问题。无重力的空间中与地上的重力空间相比，即使完成同一动作，机械手的操作是相当容易的。因此，从动机械手的尺寸与主动机械手相比为2~3倍时的操作性也是没有什么问题的。

由于没有空气对流，在宇宙空间中的散热是个困难问题。但是，因为是无重力空间，所以用于驱动机械手的执行机构能量消耗也少，所以，这也不会形成严重的困难。此外如图8-3所示闭式操纵室的两侧还装有两个大的散热板。

如上所述，装有双向机械手的有人遥控作业站可望随着宇宙开发的多样化，能够在复杂的建设、维护作业中发挥其威力。

关于宇宙用机械手，美国从登月船开始其研究已具有较长的历史，但是空间站的建造计划，机械手起着重要作用，此计划中开发的技术，不仅用于宇宙开发，对地面上用的机械手或机器人的控制技术也有很大的影响。

在日本的某一国立研究机构中也开始了对高真空中机械手的研究。

§ 8-3 海洋开发

一、海洋开发与机器人

海洋与空间一样，也是人类很早就感兴趣的研究对象。由于各种人造卫星的实用化。人对月球的考察的成功，以及由无人考察卫星观测到的数据等，人们对宇宙空间已经了解得相当详细了。但是与此相反，海洋是拥有丰富资源的另一个世界，人类不仅对它的开发不够，对它的了解也不尽详细。其原因在于海洋所具有的几个特性，例如随着水深而增大的水压力，光无法达到的黑暗区域，有的地方还有激烈的潮流以及海水腐蚀金属的性质等；这些都是人类进行经济活动的大障碍。人类与海打交道是从人本身潜入海中开始的。如在浅海中，可背着氧气瓶潜水，水再深些可由海上通过管子向潜水服内供呼吸的氧气。为了以更深的水为对象，从1930年开始，人进入承压的容器内，进行深海考察，从1960年开始，为了人在水中能自由地行动，设计了有索与无索的有人移动体。如此，人在海中的活动范围逐渐地扩大了，但是又出现了潜水病的新问题。为了防止潜水病，减压所需的时间是随着潜水时间与温度的增加而增加的，所以进行海下考察及作业等的时间比例减少，其成本就增加了。此外在海中还可能遇到种种危险。

解决这一问题的方法之一是由操纵无索的无人移动体代替人的活动，所以具有感觉与智能并可在海中进行作业的机器人是将来研究的目标。下面通过几个新的计划说明海洋开发中对机器人技术的要求。

二、海中的遥控作业

如果将目前所使用的海中作业机器以自重和可到达的深度为两座标轴画出图形时，则是以有人、无人为其特点的。即机器的重量对于有人或无人是有很大区别的，至于可到达的深度则无人的活动范围较广。不论是有人还是无人，目前都是由人根据外界的信息使用控制机械手而进行作业的遥控技术，然而实现完全自动机器人的可能性是将来的事，其技术上的问题是相当复杂的。

随着海洋活动的扩大，海中作业正在向深海化前进，使用有人机器，从经济性与安全性角度看都是存在着问题的，今后是肯定向无人化方向发展的。解决无人化的问题采用供给能量和信息传递的方法。在无人化的机器中，其控制与信息传递方法是通过中间站进行的，中间站类似在连接索的前端装有一种船锚，它即可防止因作业船的摇摆和潮力而产生的影响，又可作为电磁能源与无人机器的低能量宽频带的音响通讯使用。在实现这样的无人机器中，除了上面提到的主要原因之外，还由于近代技术的发展出现了远远超过人的眼睛感度的摄像机、在混浊的水中也可使用的音响成象系统，而且改善了通讯通道容量，特别重要的原因则是计算机的超小型化、耗电低、成本下降以及图象识别技术等软件的发展。

但是，人类由遥远地方控制机械手进行海中作业时，受到很多限制。例如，音响通讯路径的通道带宽狭窄，传递迟后较大，从动测感觉的限制等。其解决的办法是监视控制。这种方法是因人的控制或指令具有间断的特性，如何实现适应这一特性的机械手控制法，间断地给机械手以作业指令，而机械手半自动地去实现作业的各个程序动作。这样，人们就可从精密的多自由度机械手的控制中解放出来。

三、海中作业的分类

在考虑海中作业的遥控时，首先必须研究现在或将来究竟需要什么样的作业。

如将海中作业进行大致分类时，可分为海港整备、海底石油天然气的开采与管路输送、营救与打捞作业、水中结构物的建设、造船与修船、海洋的各种检测、海洋牧场与海洋摄影等。

这些作业，都是由很多微细的作业组成的，各作业的遥控装置的匹配是很重要的。即作业要求的水深、尺寸、自由度及力的大小等参数必须在遥控参数范围之内。

四、法国深海遥控作业系统

关于海中作业遥控系统的开发，世界各国都在进行。ERIC 是法国海军计划的这种系统之一，是以6000m海深为对象的，并且重视人-机械系统的干扰问题，其特点是提出了遥控共栖 (Telesymbiotic) 的新概念。

深海遥控ERIC II 系统，按前面的分类是备有支援船作业船与中间站的有索无人海

中作业机器。系统的各参数如表8-1所示。

表8-1 ERIC II 系统各参数

ERIC I	常用深度	6000m
	最大深度	7000m
	水平行动范围	300m
	速度	1m/s
	最大消耗功率	100kW
	重量(空气中)	4500kg
主 电 缆	直 径	32~35mm
	长 度	8000m
	自 重	4000kg
	常用负载	100000N
	破坏负载	190000N
支 援 船	甲板面积	300M ²
	全甲板负载	130ton·s
	系统,全部功率	700kW
	排 水 量	12000ton·s
	长 度	70m
	宽 度	11m
	速 度	0~2knot

注. knot=节(二涅/小时) 679

通过电缆由支援船供给能源和交换信息,而电缆的张力是使中间站不产生不必要的力,而根据船运动情况进行控制。

图8-6是离开中间站可以自由移动的机械手与备有各种感觉的移动体放大模型。其各参数如表8-2所示。其结构是在前面装有2个机械手,在后部2个自由度的方向架上装有主推进器,主体是一个扁平的圆体。另外,除了主推进器之外,在

椭圆体内部还装有控制移动方向用的6个推进器。与中间站的连接电缆是沿主推进器轴方向上装设的,依靠方向架的作用,推进器的方向自动地朝向电缆的方向。不管推进器的方向如何,为了保证推进方向可以自由选择,用应力传感器检测方向架的受力,对推进器的推力方向加以修正。

在航行控制中,在很宽频带内使用海底固定音响发射机接收器与宽频带的声纳,局部地区使用多普勒声纳、横向声纳,另外作为前方视野还间接地使用摄像机。

表8-2 ERIC II 的参数

全长×全宽×高	5×3×1.8m
主推进器推力	最大 10000N
姿势控制推进器推力	最大 1000N
垂直方向可变浮力	最大800N
速 度	最大 2m/s
浮 力	300N
电子机器容器	801 球形
主 装 备	前方视野电视摄像机 广泛视野声纳 音响航行装置 方向陀螺仪
辅助装备	多普勒声纳 横向声纳 海底测定仪器 海洋测定仪器
全消费电功率	100kW
重量(气中)	4~5ton



图8-6 移动体ERIC II

所谓遥控共柄可理解为把遥控操作的概念进一步引伸，其意义是在人不能进入的恶劣环境中仍给人以在场时一样的感觉。即人对这种环境中的机器进行的操作，有一种身临其境的感觉。对 ERIC II，作为向遥控共柄阶段的过渡，是以视听觉信息的反馈、手臂控制的双向化、本体运动机能的提高及运动感觉反馈为重点进行的。

人类的头部作为外界传感器主要是眼睛与耳朵，但是检测和认识目标物特别重要的是头部与身体的相对运动。因此，通过设计头部控制器检测操作者头部的运动，另外，将遥控的头部设在有自由度的台架上该台架上装有小型摄象机和 2 个麦克风，它与操作者的头部进行同样的运动。

由遥控头部摄象机与麦克风来的信息，通过电视萤光屏与耳机对操作者加以提示。目前并未给出主体视野的信息，但是将来准备用 2 台摄象机进行立体视野信息的反馈，用多个麦克风与耳机组成系统。

作业用机械手，其灵巧性是很重要的。在 ERIC II 上装设的双向手臂 MA23 的参数如表 8-3 所示。目前此手臂的缺点是手部的不良好感觉。如果将来手指可能实现双向化时，也可能实现手部的一部分感觉。

表 8-3 双向手臂 MA23 的各参数

静止位置定位精度	平 移	±3mm
	旋 转	±2°
	最大负载时位移	50mm
无负载的动特性	加 速 度	10m·s ⁻²
	速 度	2m·s ⁻¹
	可 动 范 围	1.2m
负 载 力	主 动	60 N
	从 动	200 N
起 动 力	主动操作时从动的运动	5 N
	从动操作时主动的运动	2 N

运动性的提高与运动感觉的反馈对给予操作者以在环境内操作的感觉是很重要的。一般遥控操作，构成检测移动体运动的线索，即体内感觉（肌肉运动，姿势的检测等），由于耳朵得不到加速度，角加速度等的检测感觉，操作者对移动体的运动感觉不到，变成对外界失去了方位的感觉。但是运动感觉的反馈与视觉听觉相比是困难的。如非要实现不可，就要设置可控 6 个自由度（平移 3 个，旋转 3 个）的座舱，但是由于成本与空间的关系是以视觉等实现辅助反馈的。

视觉信息是将计算机将移动体的动画像，海底的图像和障碍物取出，实时地加以表示，对操作者给以 ERIC II 的运动感觉。另外，如果能进行操纵杆的双向化，则可以把移动体本体的惯性和对移动体作用外力的感觉反馈给操作者。

与宇宙开发不同，海洋开发要求普通工业水平的经济性。因此，随着水深的增加，人在危险性高的环境下作业不只是在安全方面，在经济方面也存在着困难，所以今后对遥控作业技术的要求将越来越高。

目前完全自动化的海洋机器人还没有出现，所以对机器人的遥控操作还不得不由人来进行，如上所述，遥控技术的改进方法将向两个方向进行。一个方向是从减少操作者负担的意义出发，让机械手自动地进行作业的监视；另一个是为了提高相同操作者的操作性，给操作者以象在现场进行作业一样的感觉。简单作业时，利用前者，复杂作业或机械手方面不能独自解决时利用后者，操作者与操作机械手两者组合起来是很重要的。不论是那种方法其技术还都不完善，有待于今后继续努力。

§ 8-4 原子能工业

一、原子能与自动化

既然人在现场直接作业是不可能的，从这点看，原子能有关设备中的作业与宇宙、海洋中不同，也是在极限环境下的作业。特别是原子能开发时，为了防止放射线的照射伤害，开发自动化作业与遥控技术是不可缺少的，这些技术是原子能作业的重要内容。但是，自动化或遥控作业困难而复杂的动作只能靠人手去进行，因此还不能彻底地消除放射性的危害。另一方面原子能的发电比例年年增高，所以与原子能有关机器的运转和作业的自动化以及遥控技术是当前迫切的研究课题。

这样的自动化、遥控作业不仅保护人们免受放射性的危害，也可减少一年一次的定期检查时间，可提高设备的使用效率。进而，代替人手的机械化可以提高产品的质量与可靠性。但是，实现自动化的机械本身的故障又是招致更复杂作业的原因，如果机器的可靠性不提高，反而却得到相反的效果，这点与其它极限环境下的作业相比其要求就更加严苛了。另外必须是耐放射线的，这一点也是原子能工业的特点。

对原子能发电有关的作业，以其设备及状态进行整理大致如下：

1. 发电厂

(1) 运转时 机器的运转、工作状态的监视、异常事态的处理（报警与防止扩大）。

(2) 停止时 定期检查（排除污染、拆卸、检查、安装）、维护（排除污染、交换、修补）。

(3) 使用后 排除污染、拆卸、撤掉。

2. 核燃料再处理工厂、机器运转，排除污染、范围、检查、安装、修理。

3. 试验研究设施（内容同上）。

首先是分为发电厂与发电厂以外燃料再处理工厂等两类。而前者又可分为反应堆处于运动状态，为了进行检修、维护的停止状态，以及超过使用年限时的拆除处理。如按作业的种类进行分类时，可分为机器运动、监视、定期检查、拆卸、安装、交换、修理以及反应堆拆除等。以上的各种作业，其作业化的难易度是随着其作业本身的难易度、

周围环境条件及放射线等级等变化的，可分为完全由机械实现自动化和必须有人参加动手的。其中原子反应堆拆卸时，是有大量放射物的构造物，所以其困难是可以想象的。到目前为止只有处理含放射性能量小的反应堆经验。

二、原子能与机械手

如上所述自动化的作业应该是很多的，关于此作业自动化有几个流派，一派是将原子反应堆本身设计成易于自动化，以固定设备实现自动化的方法。当然，机器的运转、监视、检修等作业的大部分已实行了自动化，设想反应堆本身就是一种机器人。另一派是对于非用机械自动化不可的拆卸、检查、安装、修理、解体等采用机械化，而比这更复杂的作业或异常事态发生时的恢复作业则由人在安全地点操纵机器进行作业，即所谓的遥控作业。主从式机械手技术就是因为原子能的需要发展起来的。机械式主从机械手在1940年就出现了。这种方式后来又加以改进，现在仍然用于放射线环境下的作业。此机械式的缺点是作业范围受限制，以解决操作的重量等问题为目的，用电的主从连接方式在1950年代初就实现了。由于此种代换失去了力感觉的反馈，解决这一问题的方法就是双向化。现在为了进一步提高其性能与操作性，主从间以计算机连接，在进行自重与摩擦力补偿的同时，又加强了从动侧装设的感觉反馈。

按以上的说法，机器人与固定方式相反，以通用为目标，在某种程度上可自由行动的代替人自动进行作业的机器，这是狭义的机器人。为了实现这一目的，在硬件中应该有移动机能、感觉机能及遥控作业机能，这些机能全有，并且是完全可自动活动的机器人到目前为止还没有达到实用阶段。把移动机能与感觉机能结合起来，在机器中间一边移动一边进行监视检查的检查机器人首先就快要实用化了。而包括操作在内的手臂形是移动技术与操作技术的综合，其自动活动的实现多数是属于对人工智能方面的研究，目前还只能从遥控进行作业。而移动机构是通用机器人不可缺少的机能，但是对原子能用的机器人，必须在想象不到的环境里移动，所以要假定各种移动环境，研究适合的移动机构。

三、遥控作业

传递从动机械手指令的方式分为两类。一是在操作者的手臂上装有与从动机械手结构类似的主动机械手，把持着它的前端使其运动，发出操作的指令型（图8-7）；二是与以钳形操作杆等形式送出指令的能量机械手型。前者象人进行手工作业一样，通过给出指令就可得到精密的动作，可以进行更复杂的作业；后者由于对操作者的负担较重用于从事简单的作业。

图8-8是用于维护核燃料循环设备而开发的双臂型双向伺服从动机械手的简图。这是一个各臂与夹钳（手部）都是由DC 马达驱动的8自由度机械手。特别是其中手腕有3个自由度，与人的手腕很接近，为了减少自重的影响，如图所示采用龙门形式，为了进一步轻量化打算使用CFRP，这是它的特点。

但是这样的从动机械手不得不进行遥控作业，现在加强了遥控作业中计算机的作用，正在进行提高遥控作业性能的研究。

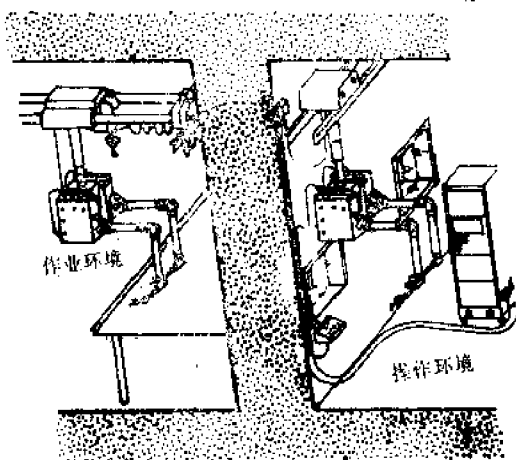


图8-7 主从式机械手

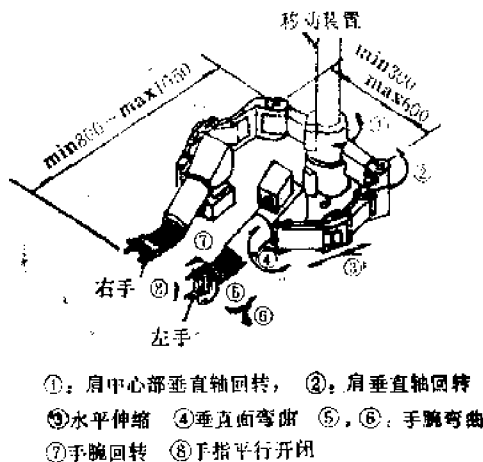


图8-8 双臂型机械手简图(龙门型)

法国的维尔吐 (Vertut) 用计算机型遥控作业对计算机提出了以下 4 项任务。

- (1) 视觉与运动感觉的反馈或为了作为指示的传感信息处理。
- (2) 代行部分作业。
- (3) 监视并表示包括操作者在内的系统及紧急停止。
- (4) 辅助规划动作。

维尔吐主张对原来的力反馈中加入作为遥控触觉作用的非接触传感器的信息，正在研究手腕部装有非接触传感器的机械手。

第二项是与实现管理控制有关的。这是与工业机器人的示教与录返机能相似的，但对遥控操作，由作业性质来看，与要求机器人更适应的动作是不同的。例如，大概地指定位置，利用手部的传感器使对象物自动地定位等。目前，只是代行部分作业，是基本机能完善的自动化，如摄像机的自动跟踪、移动体的一部分机能的自动化等。

第三项的监视是根据系统的异常状态，在紧急停止以前发出不同级别的报警。

这种使用计算机型的遥控作业可以说是由于 (2) 项机能的扩大，在可以自动活动机器人系统过程中进行的，这时，不只是机械的从动方面，解决同操作者协调的问题是非常重要的，对人的操作性也必须进行分析。

四、移动机能

上述维尔吐提出的原子反应堆等在极限环境下进行作业的从动系统一般结构如图 8-9 所示。

这种从动系统的核心是作业用机械手①、⑦和搭载它们的移动体⑧。⑧是将具有双重遮蔽门的移动车⑩，⑪搬送到将极限环境同外界隔开的边界壁，在将外界与作业环境隔离的情况下送进作业现场。⑩与⑪是能源与通讯用的线路，通过它们接受指令，另外也利用自身的传感器信息进行自动或遥控的作业，⑨是监视包括从动在内的全体作业现场的传感器，它也装在移动体上面。在实现这样的从动系统时，可以预想反应堆周围的情况，所以要求在不平坦的复杂环境中可移动的机能，目前正在研究的有车轮型、无限轨道的履带型、车轮与脚的混合型，此外还有特殊方式的壁面磁力吸附型等移动机构。

法国沙库勒研究所研究了车轮型从动系统。移动机构是一般的车轮,但是4个车轮可

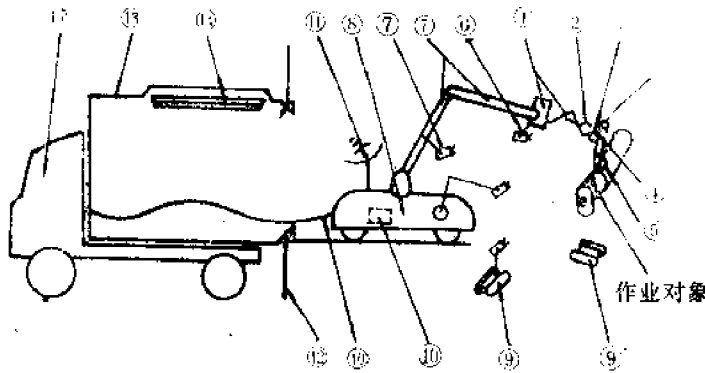


图8-9 作业用从动系统的结构图

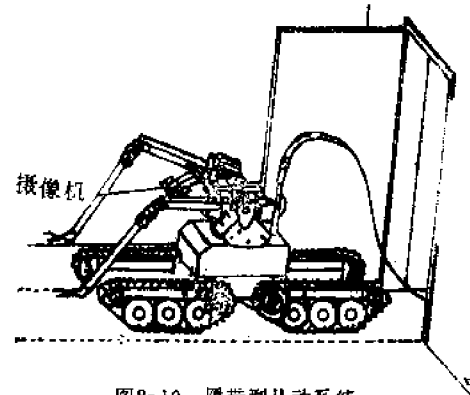


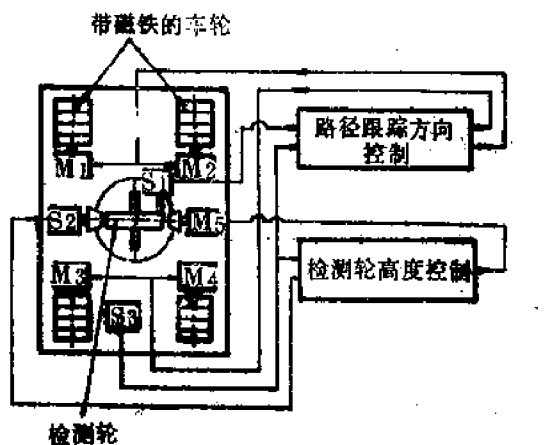
图8-10 履带型从动系统

通过操舵机构增加移动方向的选择性,以提高狭窄空间中的移动机能。从动机械手一般装在定位用的臂上,以增加手部定位的自由度。它叫做中间定位装置,相当于图8-9中的⑦。另外,履带型以西德卡鲁斯路研究所的最有名。如图8-10所示,本体是由4个履带轮支持,每个都可单独驱动,并可相对本体改变姿态,所以易于上下台阶和翻越高差地形,改变车体姿态后可提高机械手的操作性。

另外,还有在本体上装一对履带轮,用连杆改变履带轮的形状,保持姿势的平衡,可适应凹凸不平的移动环境。这种机构简单、可适应的环境又多样化,这是很大的特点。

在原子能用机器人中纯步行的还没有研究,但有与车轮混用的5足移动形机构。在平坦的地方,是用装在各足上的车轮行走,在遇到阶梯时使各足的4自由度(上下、前后、足的旋转、车轮旋转)起作用,使本体边保持平衡边进行移动。由此机械可得到全方位移动,这时具有旋转等特殊移动机能,但是在凹凸等地面上下时控制不得不变得复杂,而出现移动速度降低的问题。

除了以上通用的移动对象之外,正在研究可沿反应堆容器等表面移动的机器人。这



M1~M4:行走马达 M5:检测轮高度控制马达,
S1:检测轮方向位移传感器, S2:检测轮高度传感器,
S3:本体高度用传感器

图8-11 磁力吸附式车轮移动机构

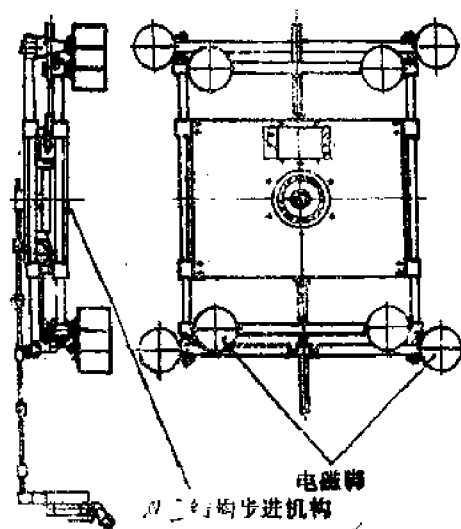


图8-12 磁力吸附式步行移动机构

是沿着正在运行的反应堆容器表面上的轨道移动超声波探伤器的方式发展起来的，以磁力吸附在对象物的金属表面上移动。

图8-11是车轮型，图8-12是步行型。前者的车轮中装入永久磁铁，4个车轮以DC马达驱动。操作方向与前进通过左右车轮的速度控制进行的。后者是由脚部有4个电磁铁的2组脚机构组成，通过给它们加入平移和旋转的相对位移而实现移动。但是对探伤检查必须连续定位，所以本体支持采用双重结构，在一步间进行插补。

以上对移动机能从结构方面作了介绍，与操作时一样，为了减少遥控操作对人的依赖性，使其增加自动性，识别现在所在的位置与实现沿给定路径移动的导引技术是不可缺少的。例如，为了进行最后的探伤检查，要求导引的位置精度在 $\pm 1\text{mm}$ 以下，现在正在研究激光与线性光传感器组合的位置测定方法。

参 考 文 献

[1] 中野栄二、小森谷清、新井健生共著：《ロボット工学应用技术》，东京株式会社养賢堂发行，1985年。

[2] E·И·尤列维奇等著、刘兴良等译：《机器人和机械手控制系统》，新时代出版社，第1版，1985年。

[3] 中西康二著：《ロボット・システムにおける空気圧制御》，油空压化设计，第22卷 第1号，1984年。

[4] 高桥隆通著：《空気圧シリンダの特性の簡易判定》，パワーデザイン，第24卷第6号，1986年。

[5] 门泰一著：《空気圧シリンダの特性上の問題点と対策の着眼点》，パワーデザイン，第24卷 第6号，1986年。

[6] 郑洪生主编：《气压传动》，机械工业出版社，1981年。

[7] 森 博昭著：《产业用ロボットの油圧制御》，油空压化设计，第22卷 第3号，1984年。

[8] 伊藤 隆等著：《油圧関節型ロボットについて》，油圧技术，1985年第1期。

[9] 花房秀郎著：《関節形ロボットの制御を目的とした電気油圧サーボ系の設計》，油圧と空気圧，第13卷 第7号，1982年。

[10] 西 義和等著：《产业用ロボットの連続軌迹制御における精度向上方法》，システムと制御 第24卷 第3号，1980年。

[11] 大筑康生等著：《ソフトウェアサーボによる、関節形ロボットの制御》，システムと制御，第27卷 第9号，1983年。

[12] 林建亚等著：《6自由度関節式液压伺服机械手的研制》，流体控制工程，1986年。

[13] 加藤一郎等著：《全油圧駆動による2足歩行ロボットの实现》，油圧と空気圧，第17卷 第1号，1986年。

[14] Richard P. Paul : ROBOT MANIPULATORS: MATHEMATICS,

PROGRAMMING, AND CONTROL The Computer Control of Robot Manipulators, 1981年。

[15] 中岛弘行著:《空气压应用机械と回路设计》,日刊工业新闻社,1974年。

[16] 孟繁华等:《关节形机器人电液伺服系统的动力机构设计》,哈尔滨工业大学学报,1987年增刊。

[17] 孟繁华等:《非对称ミリンダを有する电气油压サーボモータの周波数特性》,油压と空气压,第14卷 第4号,1983年。

[18] 孟繁华、李天贵编:《气动在自动化中的应用》,国防工业出版社,1988年。