

机器人控制系统

肖春林 刘兴良
(北京工业学院)

摘 要

本文概述了机器人控制系统的特点、感觉装置、控制装置及传动装置,并对机器人控制系统的发展作了一点粗浅的评述。

一、前 言

机器人发展快应用广,控制是它的一个关键问题。机器人控制系统目前尚无统一定义,但可以说,较完善的机器人控制系统一般包括感觉装置(用于收集内部、外部信息),控制装置(其作用是处理信息、规划任务、作出决策和产生控制指令),传动装置(用来使机械的手及行走装置完成操作或进行行走)以及与外界(主要是人)联系的装置^[1]。机器人控制系统的复杂程度常常代表了机器人的水平。机器人也常常根据控制来分类,如把机器人分成为:第一代程序控制的机器人,第二代具有感觉的自适应控制机器人,第三代智能机器人^[1];或者分成:人操纵的机械手,固定程序控制的机械手,可编程序的机械手,示教再现型机器人,数字控制的机器人,智能机器人^[2]。

二、机器人控制系统的类型及关键问题

1. 机器人与一般自动机的区别^[3]

机器人是一种灵活通用的自动机,是一种机器。与一般自动机相比,机器人的特点是:(1)自由度多,可以完成灵活的操作和运动;(2)机器人的控制装置已不是只完成放大、微分、积分等运算的简单装置了,而是具有记忆、识别能力,可以进行推理判断,进行决策,产生控制作用的装置;(3)机器人的感觉装置是可以感受复杂物理量的装置,如视觉、触觉、接近觉等。

2. 机器人控制系统的基本类型

机器人控制系统的种类很多,原理各异,但最典型的可以分为如下三种:(1)图1所示的示教再现型机器人控制系统^[1],示教时为开环系统:控制台(示教装置)——放大器(控制器)——执行机——机械手传感器——存贮装置。再现时为闭环控制:存贮装置——比较器及放大器(即控制器)——执行机——机械手——传感器——比较器。目前

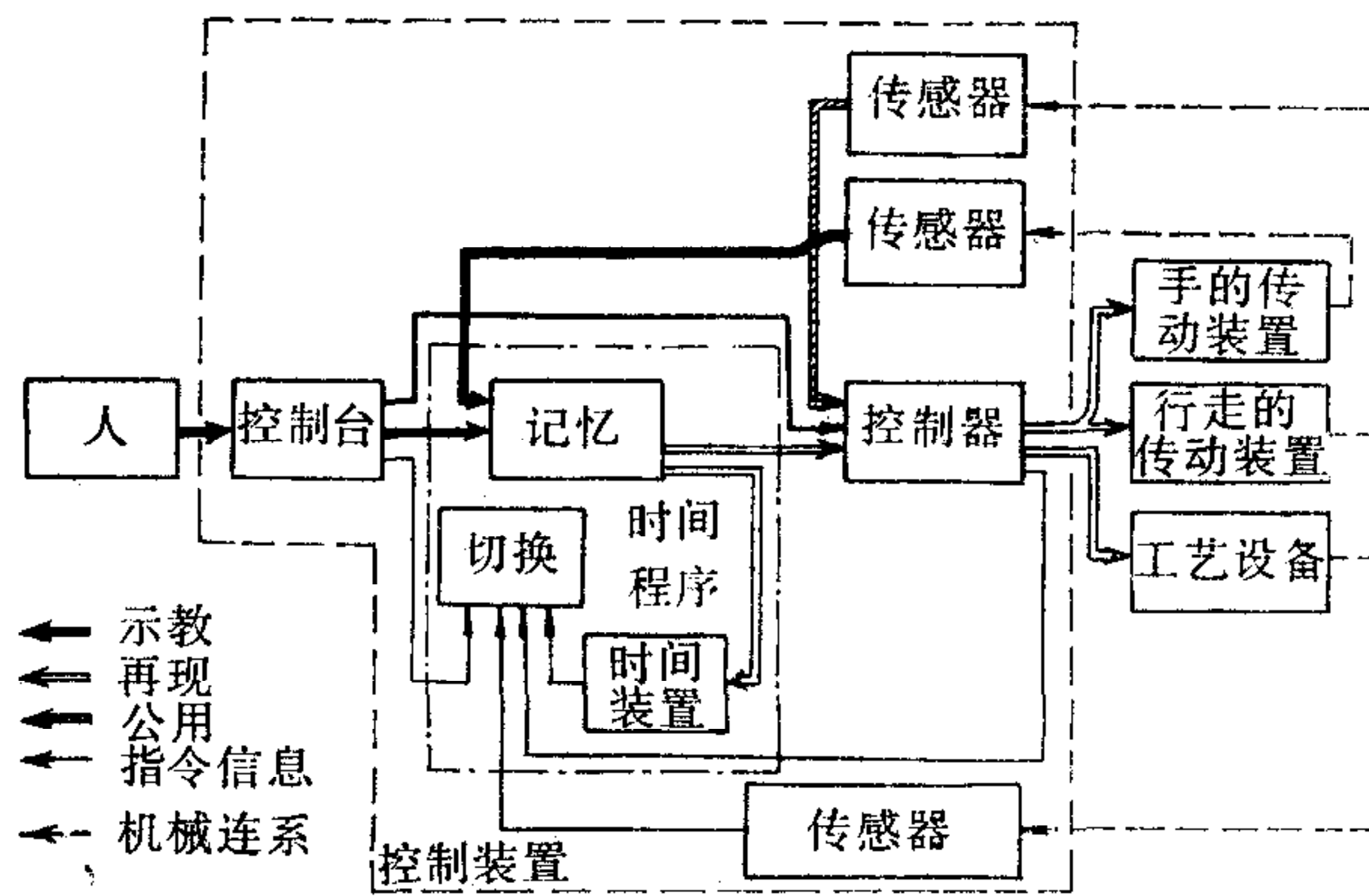


图 1

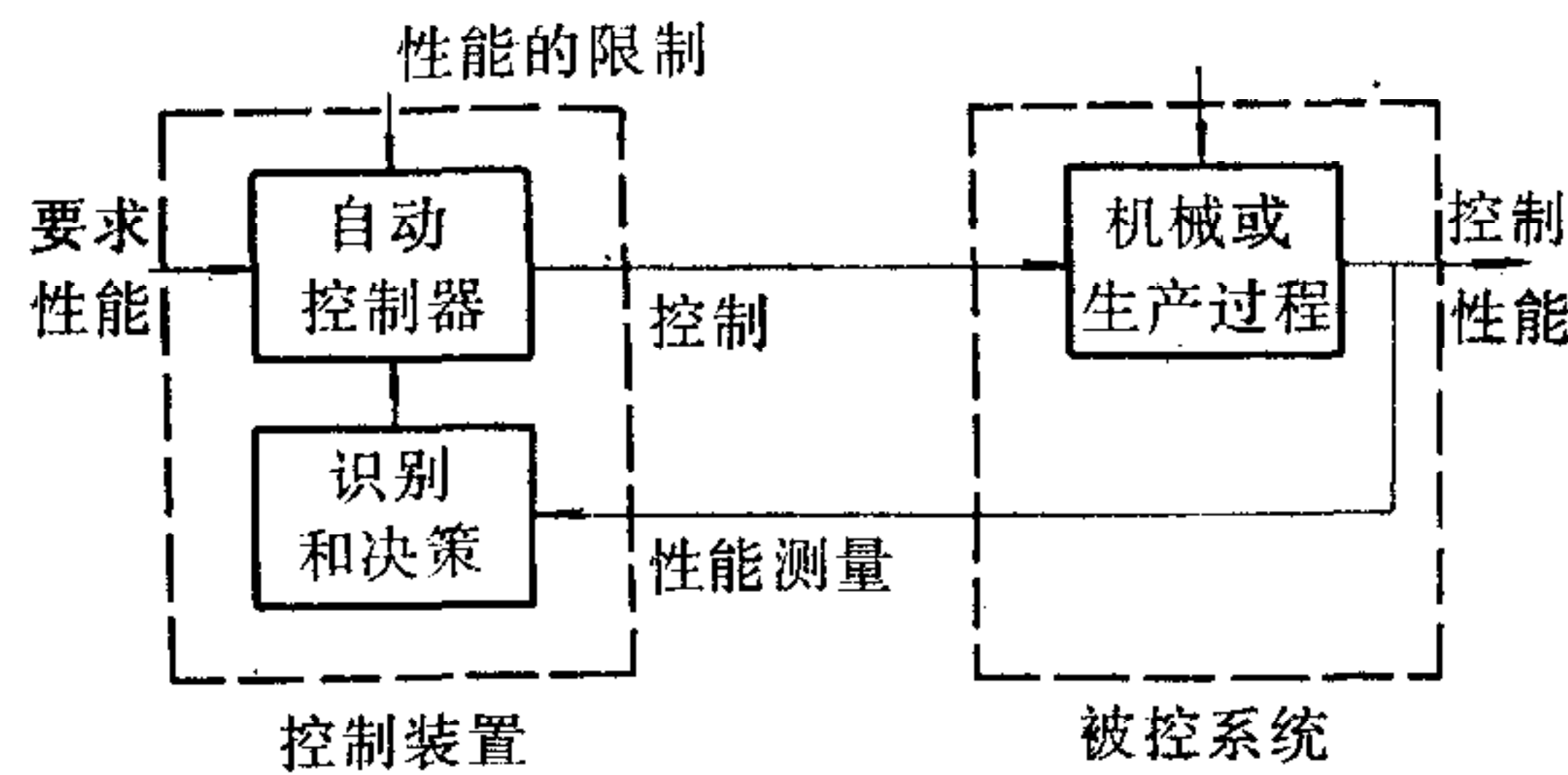


图 2

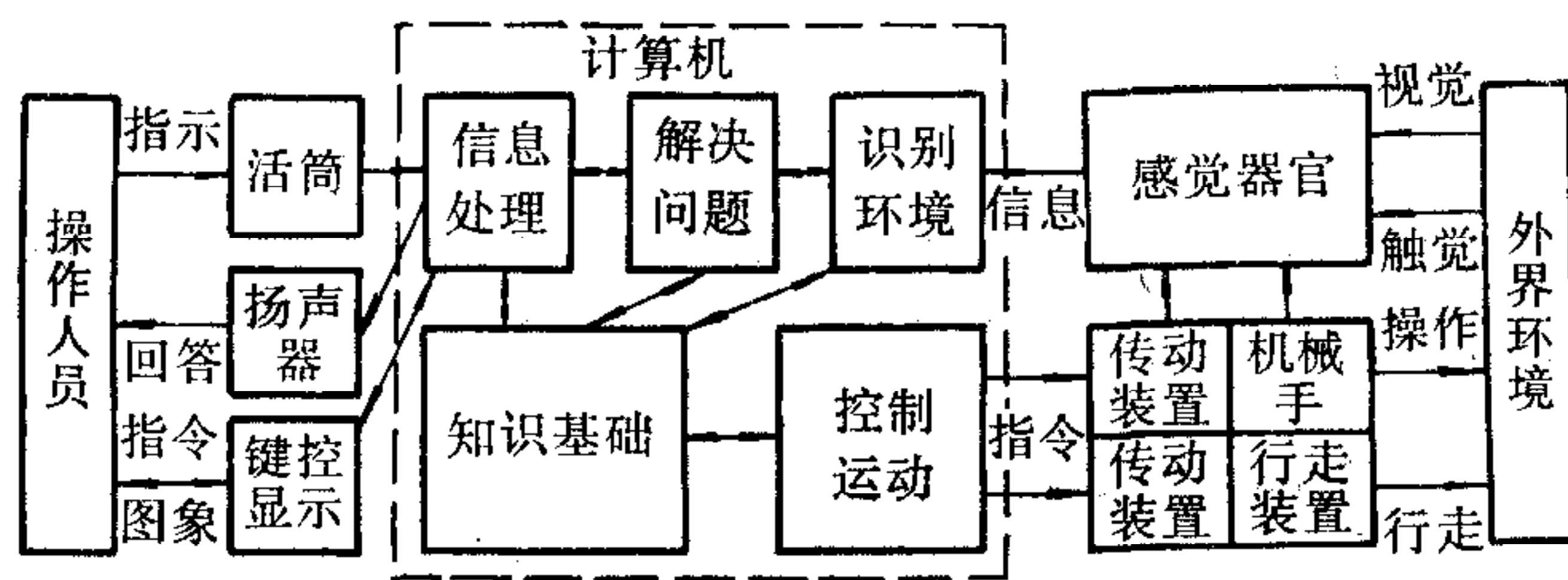


图 3

工业机器人一般为示教再现型。(2)图 2 所示的适应性控制系统^[4],由感觉装置测得外部信息及内部状态变化,经计算机处理后进行适应控制,以保证机器人的性能指标达到要求值或最优。实现适应性控制可以有不同的方法,如采用分级控制系统(由基本控制装置控制对象,由适应控制装置按性能指标及状态变化调节基本控制装置)^[1],采用多种检测装置用计算机进行控制^[4]等等。(3)智能机器人控制系统^[5],如图 3 所示。

3. 机器人控制的关键问题

目前机器人控制系统繁简相差很大,其决定因素主要是^[6]:(1)机器人机械部分(机械手及行走装置)的几何结构;(2)操作及行走的状况;(3)运动速度及精度;(4)动态模型;(5)有无干扰;(6)示教方法;(7)是否需要视觉、触觉、力反馈及简单人工智能功能。

表 1 机器人感觉装置分类

用途	类型	物理量	传感器	说 明	
内 部 传 感 器	位 置 传 感 器	位 置 和 位 移	电位计	简单,尺寸小,不需附加放大器,寿命低,多用于 点位控制	
			自同步机旋转变 压器	结实可靠,抗干扰性能好,不需附加放大器,成 本高	
			行程开关	简单,成本低,种类多(机械式、光电式、磁控接 触器等),一般用于点位控制或保护装置	
			光码盘	精度高,寿命短,价格昂贵,一般用于要求较高的 机器人控制。位置式光码盘上附加测速度刻线可测 速,脉冲码盘加上计数器可测位置	
	速 度 传 感 器	速 度	测速机	坚固,无需附加放大器,价格适中,常用	
			力矩传感器 负载传感器 应变仪等	用于形成反馈、构成双向伺服系统、按重量选重 物、检测负载、防止过载等	
	外 部 传 感 器	视 觉 传 感 器	位 置、 外 形、 物 体 存 在	光电摄像管,硅光 导摄像管,阴极射线 管,图象检测器	收集二维信息,再利用双眼原理或利用距离信息 识别三维物体形状、大小
				超声波人工眼	可发现透光物体,与光照无关,不受环境影响,精 度不高
				光电变换器	简单,实用,用传感器阵检测外形
		触 觉 传 感 器	测 接 触	导电橡胶,电动 开关,气动限位开 关,铍铜片等	简单,便于应用,成本低,响应频率低,用于限位, 防止碰撞等等
测力(矩)				转矩测量仪,应 变仪、压电元件,导 电橡胶	用于检测压力分布和机械手各环节受力,以实现 精确插入操作或控制握力等等
测 滑 动			滚轮式、针状式、 压力式滑动传感器	主要用于防止物体从手爪中滑出	
识 外 别 形			接触传感器阵,人造 皮肤,抓握式传感器	相对光学视觉传感器来说,简单,易于分析,实用, 但信息量少,应用受限制	
接 近 传 感 器		近 距 离 内 存 在 物	电磁式	可靠,坚固,只检测金属物,易受干扰	
			光电式	能准确定位,寿命短,不坚固	
			电容式	可检测金属和非金属物,精度高	
	超声波式		精度不太高,不受环境干扰		
	液动式		灵敏度高,测距范围小,信息处理难		

三、感 觉 装 置

机器人所需要的信息主要由感觉装置(传感器)将被感受到的物理、化学特性转换成信息(通常是电信号)^[16], 经过初步处理使信息得到改善, 再经过译释变为有用信息以供使用^[6]. 后两个过程是信息处理过程, 一般由计算机来完成.

目前最常用的传感器有视觉、触觉和接近觉传感器等. 表 1 列出了传感器的一种分类^[5].

对机器人传感器的要求可概括为: (1)尺寸小重量轻, 结构简单易于装在构件上; (2)工作可靠, 寿命长; (3)抗干扰性能好, 对环境的适应性强; (4)价格便宜、调节方便、维护简单; (5)分辨力高, 所获信息便于处理; (6)在必要时可以用无线方式传递信息.

人所获得信息的 90% 是由视觉获得的. 机器人完全模仿复现人的视觉系统是困难的, 主要困难在于如何处理分析视觉信息, 构成反映外界的模型. 用大容量计算机处理视觉信息, 则实用性下降, 经济效益不高. 机器人视觉系统最好是模仿人视觉系统中起主要作用的环节. 图 4 给出了一种方案. 其中指令计算机产生指令, 控制成像跟踪装置, 保证摄像机自动跟踪目标, 并且调节摄像机焦距及光圈, 以便获得二维图象. 许多二维信息经过处理后可得到三维物体的信息.

触觉对机器人来说是非常重要的, 虽然其信息不如视觉信息多, 但易于处理, 实用性强. 根据人的触觉及压觉都有一定阈值的原理, 机器人触觉可采用可控的阈值与传感器的刺激响应值进行比较, 利用其变化规律确定被识别物体的外形, 这是一种用处. 触觉还有其他许多用途, 如表 1 所示.

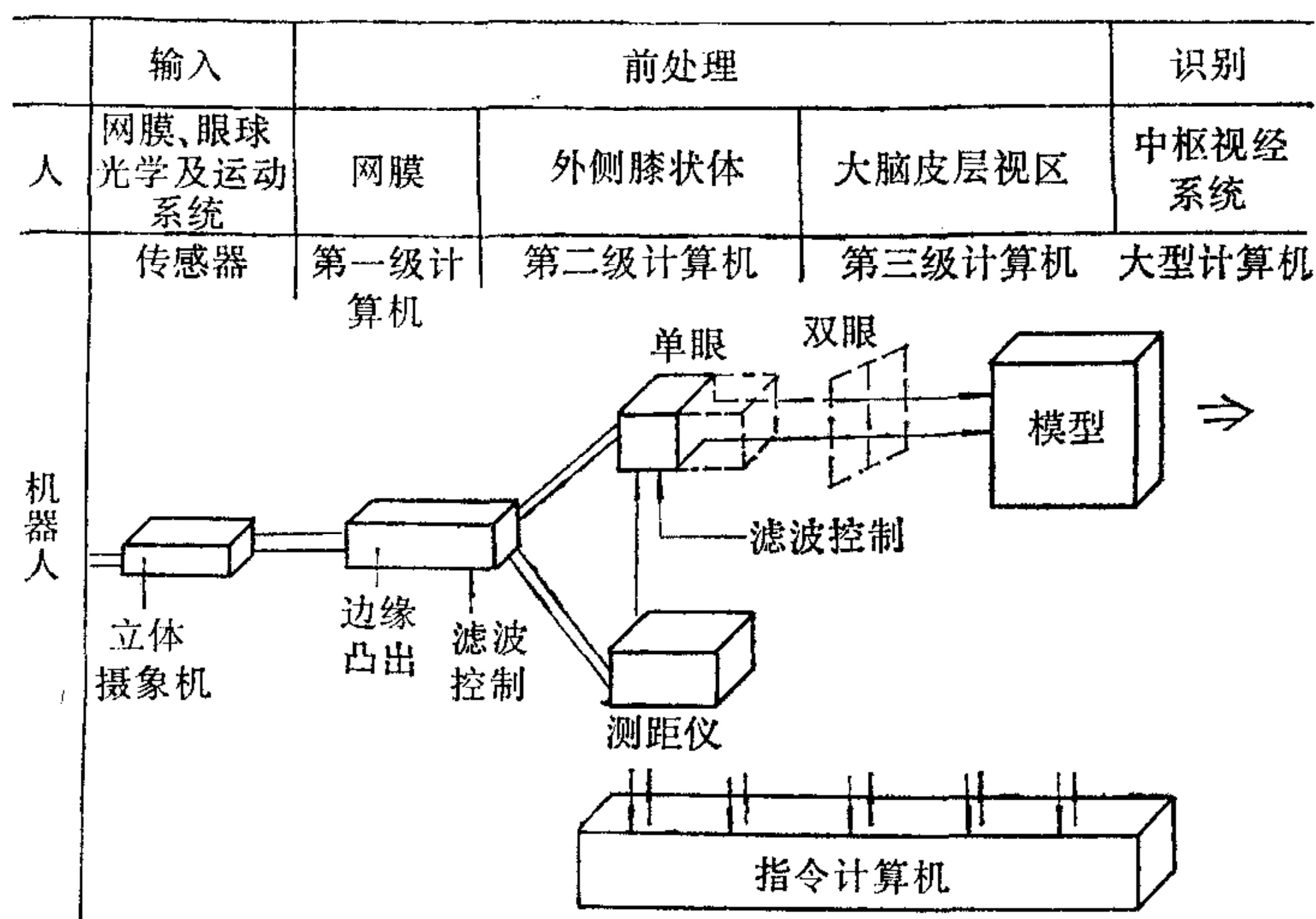


图 4

四、机器人传动装置

1. 特点

对机器人传动装置和对一般自动装置的要求有如下相似点^[5]: 单位重量出力大, 速度高; 滞后小, 反应快, 传动平稳; 定位精度高, 启动制动性能好; 安全可靠, 使用维护方便; 体积小, 重量轻, 效率高; 成本低, 寿命长。

与一般传动装置相比, 机器人的传动装置有如下特点^[2]: (1)机械手自由度多, 各自由度的传动装置之间相互关联; (2)机械手结构形状不断变化, 负载变化大(如 100%), 为保证稳定工作, 一般要有速度稳定回路, 见图 5; (3)机械部分转动惯量变化大(如 30%), 机械手的运动应无超调、无冲击, 要求传动装置没有超调现象; (5)传动装置的谐振频率应小于机械部分谐振频率的二分之一; (6)具有严重的非线性。

2. 传动装置及主要定位形式^[7]

传动装置完成的运动分为 PTP (点位)与 CP (轨迹)控制两大类。传动装置可为开环也可为闭环控制。一般说开环传动装置简单、便宜, 多用于 PTP; 闭环传动装置则较复杂、价格较高, 但适于实现 CP 控制。定位精度尚无统一标准, 表 2 给出了一种标准^[8]。目前工业机器人定位精度平均约为 0.3mm (其运动范围约为 1m 左右)。

表 2 定位精度等级

等 级	相对误差%
0	0.01
1	0.01~0.05
2	0.05~0.1
3	>0.1

开环传动装置可以采用机械挡块限位器以及限位开关等进行定位。一般采用减速及停止两级完成定位, 但速度较低时尽量采用一级限位。闭环伺服传动装置除用于 CP 控制外, 亦可用作多点 PTP 定位。为保护系统, 闭环传动装置也要装设限位开关、限位器。

八十年代初, 工业机器人采用电动 (约占 20%)、气动 (约占 30%) 以及液压 (约占 50%) 三种传动装置^[9]。电动传动发展很快, 智能机器人以及所谓福利机器人、教学机器人多用电动传动装置。

3. 传动装置的组件

传动装置的执行元件主要有液压油缸、马达、直流伺服电机、步进电机、力矩马达等。双速电动机组、直线电机^[7]以及最近发展很快的印刷电机、无刷电机等都是很有前途的执行元件。

驱动执行元件的功率放大装置, 最常用的有电液伺服阀、可控硅功率放大器、晶体管线性功率放大器、晶体管脉宽调制电路等, 后者尤其引人注目^[10]。

机械传动部件最常用的有齿轮减速器、齿轮链条传动, 滚珠丝杠及谐波减速器等。后两种机械传动部件发展很快, 有许多优点, 适用于机械手传动。由于机械手各关节的运动是逐级操纵的, 所以减速器体积小、重量轻、效率高是十分重要的。为把腕关节的驱动传动元件移到大小臂关节之后, 采用了链条、拉杆等机械传动部件。

传动装置最值得注意的(也常常是设计机械手传动装置成败之一个关键)是关于刚度

问题。机械传动部件的刚度及质量决定其标称角频率 $\omega_{0m} = \sqrt{k/m}$ 。若机械传动部件在传动装置闭环之外,希望有^[11]

$$\omega_{0m} \geq 2\omega_{0A} \tag{1}$$

其中 ω_{0A} 为传动装置的执行元件的角频率,它一般取为

$$\omega_{0A} \approx 1.5\omega_{0l} \tag{2}$$

此处 ω_{0l} 为闭环传动装置的标称角频率。若机械传动部件在传动装置闭合回路之内,则希望^[12]

$$\omega_{0m} \geq 2\omega_{0l} \tag{3}$$

若机械传动部件有两个频率,则第二个角频率应是第一主频率的二到三倍。在设计机械手时要特别注意传动关节(如齿轮、轴承等)的刚度。机械部件的间隙、弹性变形及摩擦引起的传动误差也应充分加以注意。

对于图 5 所示的控制系统,根据通频带和不产生超调的要求可推导出速度反馈系数 K_v 及误差控制环节放大系数 K_e ^[12],

$$K_v = \left[(K_{v0}K_m + F) \sqrt{\frac{J_i}{J_{0i}}} - F \right] \frac{1}{K_m} \tag{4}$$

$$K_{v0} = (2 \sqrt{J_0 K_e K_m} - F) / K_m \tag{5}$$

$$K_e < \pi^2 f_0^2 J_0 / K_m \tag{6}$$

其中 $J_i = D_{ii} + I_{ai}$, 是第 i 个关节的有效转动惯量; D_{ii} 为第 i 个关节的等效惯量项; I_{ai} 为终端控制器(执行机)折算到第 i 个关节上的惯量; J_{0i} 为对应于 $\omega_0 = 2\pi f_0$ 的转动惯量, ω_0 为特征频率; K_m 为执行电动机力矩传递系数; F 为阻尼系数。

4. 双向力传递系统及其应用

主从操作机或遥控机器人采用双向伺服系统,其特点是:主动侧和从动侧可以是对称的系统或不对称的系统,主动侧与从动侧伺服系统传动装置有双向传递特性,从动侧的输出按比例(或一定函数关系)跟踪主动侧的输入,从动侧的负载力(力矩)按比例(或一定

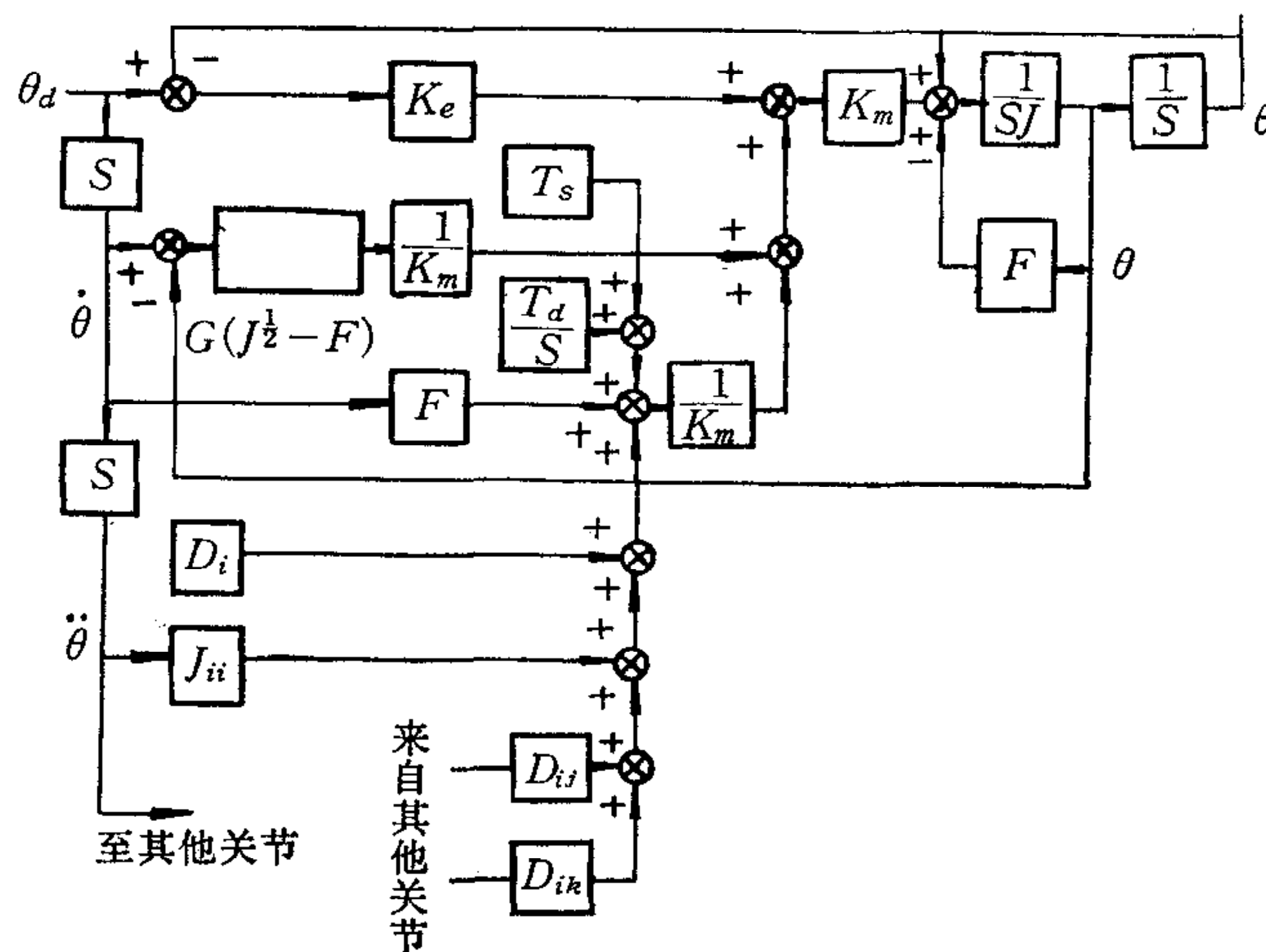


图 5

函数关系)反应到主动侧的输入轴^[13],图 6 为反馈式双向传动系统。

双向力传递伺服系统可以用来实现感受负载力(矩)的操作,工业机器人利用双向作用原理检测操作中之阻力,用计算机计算后实现有力感觉的操作^[14]。

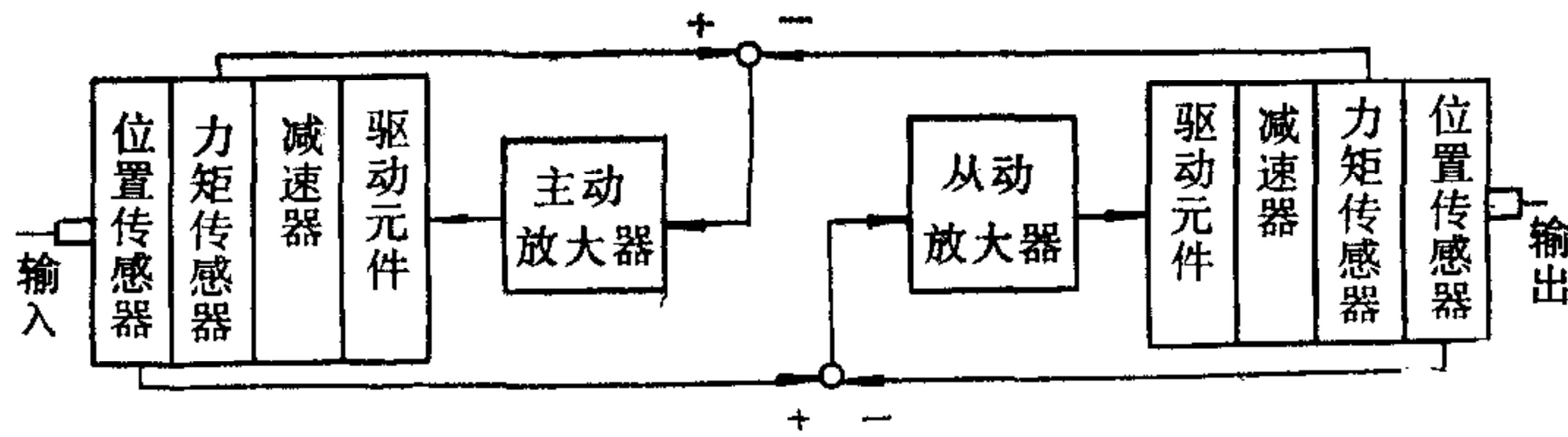


图 6

五、控制装置及控制算法

对于智能机器人来说,控制装置及算法是很复杂的,目前正处于发展之中,这里只对工业机器人稍加以说明。

1. 工业机器人控制装置硬件

当前工业机器人控制装置产生的运动指令有位置控制指令及速度控制指令之分。在采用位置控制式传动系统时,速度指令是用于改善其性能。若控制装置用于简单存贮示教信息,其存贮方式有集中存贮和分散存贮之分。示教信息有集中和分散之分,而动作控制顺序有按时间(限时控制、定时控制)或按程序控制两种^[7]。

运动轨迹控制信息可以根据有限示教点信息由计算机进行插值计算给出,或根据约束条件,用多项式规律由计算机计算出来。计算机亦可用于记忆各关节运动信息及时间信息,用来作为再现时的指令。这种方法要求控制装置存贮容量大,而其适应性差,应用受到限制。

目前工业机器人一般为示教再现型或运动轨迹计划得很完善的机器人。

2. 机器人的实时算法

当前研究最多的最为关心的实时算法可以归纳为:

(1) 构成基础的人工智能。主要有两个方面,一是全面控制管理,如规划任务,构成最优策略等;二是单机的初级人工智能控制,如躲避障碍物,实现插孔操作等。工业机器人目前具有人工智能功能的不多。

为便于与机器人交换信息并实现用计算机控制机器人,已研制出多种机器人专用控制语言,如 AL 语言、ARM 语言、EHOS 语言以及 POKOJI 语言等。

(2) 感觉装置获得信息的处理。目前从事视觉研究的人很多,在每年的机器人讨论会上关于这方面的文章约占一半。但目前工业机器人还不能采用实用的视觉系统,其根本原因在于视觉信息处理有困难:第一,目前,无论采用什么方法,计算机在将二维图象信息变成一维时序信号时,由于处理时间长,所以不能满足实时控制的要求;第二,用两组二维图象信息,或二维图象信息加上距离信息来识别三维物体,都还存在着如何能最好地进行识别的问题。

机器人与联系装置的一个重要问题是识别声音、理解语言以及生成自然语言问题,目

前的水平仍是采用简单声响或识别和生成少数标准的语句。

力觉、触觉和接近觉的信息处理相对容易些,并有一定应用,如具有力反应操作防过载、防止碰撞以及自动行走等。

(3) 运动控制,分为运动学控制及动力学控制^[2]。运动学控制的主要问题是要求进行位置控制的计算。为了使机器人手爪产生移动 $\mathbf{x}(x_1, x_2, \dots, x_6)$, 应求出机械手各关节(这里假定为 6 个)的运动变量 $\mathbf{q}(q_1, q_2, \dots, q_6)$,

$$d\mathbf{q} = J^{-1}d\mathbf{x}. \quad (7)$$

其中 J 为 6×6 的 Jacobian 矩阵; $d\mathbf{x}$ 为手爪运动的六个变量增量组成的向量; $d\mathbf{q}$ 为六个关节控制变量的增量组成的向量。当关节为旋转型关节时, q_i 为转角; 当关节为直线运动关节时, q_i 为位移。求解这个方程是困难而繁琐的。

用微型计算机计算 dq_i , 就可使机器人手爪按要求的轨迹运动, 但在运动速度较大时, 控制精度达不到要求。

为使控制精度达到要求, 必须采用动力学控制。近几年来, 研究动力学控制问题的人员猛增。但目前还没有在工业机器人中得到很好应用。

利用拉格朗日第二方程可推导出计算第 i 个关节的控制力(力矩) F_i 为^[12]:

$$F_i = \sum_{j=1}^6 D_{ij}\ddot{q}_j + I_{ai}\ddot{q}_i + \sum_{j=1}^6 \sum_{k=1}^6 D_{ijk}\dot{q}_j\dot{q}_k + D_i, \quad (8)$$

$$D_{ij} = \sum_{p=\max(i,j)}^6 \text{Trace} \left(\frac{\partial T_p}{\partial q_j} J_p \frac{\partial T_p^T}{\partial q_i} \right), \quad (9)$$

$$D_{ijk} = \sum_{p=\max(i,j,k)}^6 \text{Trace} \left(\frac{\partial^2 T_p}{\partial q_i \partial q_k} J_p \frac{\partial T_p^T}{\partial q_j} \right), \quad (10)$$

$$D_i = \sum_{p=i}^6 -m_p g^T \frac{\partial T_p}{\partial q_i} \mathbf{r}_p. \quad (11)$$

其中 D_{ij} 为相关联的惯性项, 当 $j=i$ 时, 为第 i 个关节的有效惯性; D_{ijk} 为与哥氏加速度对应的惯性项以及与离心加速度对应的惯性项 ($j=k$); D_i 为重力项影响; \mathbf{r}_p 表示 p 号连杆在 p 坐标系中的重心向径; I_{ai} 为终端控制器(即执行机)的惯量项。

进行上述动力学控制计算的关键是, 第一, 模型要简单; 第二, 计算机计算速度要快。为能方便地实现动力学控制, 可以采用 PID 控制、自适应控制和非线性控制等方法^[15]。对于非线性的机器人数学模型可将其线性化, 采用非线性控制方法进行控制, 可以构成稳定的控制系统, 而且具有一定鲁棒性^[2]。为了进行更优质的动力学控制, 可以由计算机计算出补偿项, 进行补偿控制^[12]: 速度、加速度补偿; 重力项影响补偿; 相关联项影响的补偿; 相互产生的哥氏加速度项影响的补偿等等(参看图 5)。

六、对我国机器人控制发展之浅见

基于以上对机器人控制的概述, 提出如下粗浅看法:

1. 相对软件来说, 更要注意硬件的发展。其原因有三: (1) 机器人技术是在计算机技

术、微电子学、仿生学等发展的基础上发展起来的,到八十年代初期已达到普及应用阶段,而我国目前仍然处在进行基本技术发展及推广应用阶段,其主要关键是硬件。(2)国外机器人技术在八十年代除普及应用、提高效益外,最重视的是研究更先进的软件,以求把机器人水平推到更新的高度上。我国目前不能软、硬件平均使用力量,而且软件水平与国外差距相对小些,一些费钱费人力的突破性理论研究只能适当地进行。(3)我国过去对机器人所涉及的有些硬件,如计算机接口、传感器、执行机等重视不够,其技术水平不高已影响了机器人技术的发展。

2. 发展硬件应特别注意如下几点:(1)元、器件小型化。微型计算机在十年内发展了五代,对科学技术的发展产生了巨大影响。机器人元、器件小型化可以:第一,采用大量元件增加冗余度以提高控制可靠性;第二,小型传动装置使整个控制系统之设计及实现更加容易;第三,传感器小型化才能达到实用程度(如采用高密度的传感器阵),并易于安装在手脚各处。(2)提高元件的可靠度。目前国外机器人可连续工作数百小时无故障(希望达到1000小时),而我国目前元件可靠性差,不仅影响了研制工作,而且妨碍了其推广应用。(3)降低元件价格。有些元件价高影响了机器人技术的发展,这是许多人所公认的。

3. 重视发展硬件的同时注意如下软件的发展:(1)简化机器人数学模型;(2)寻找简单实用的运动学控制算法;(3)简化动力学模型及实用算法;(4)基本的人工智能功能;(5)更好地应用触觉、力觉、接近觉信息;(6)注意研究简单的实用的视觉系统;(7)手眼控制及双手协调控制;(8)机器人专用控制语言的研究;(9)外界环境模型的建立;(10)多级计算机控制大系统的研究。

4. 注意机器人控制技术的综合发展,及时利用其他科学技术的新成果;注意克服电、机械以及硬件、软件人员互不熟悉对方业务的现象。

参 考 文 献

- [1] 尤烈维奇, E. И. 机器人与机械手控制系统, 刘兴良, 满淑芬译, 新时代出版社, 1985年.
- [2] Tarn Tzyn-Jong, Robot Dynamics and Control, 1985年.
- [3] 梅谷阳二, 从自动化走向智能机器人的发展谱系, 日本的科学与技术, 1983年.
- [4] Warnecke, H. J., Cleaning of Castings with Sensor-Controlled Industrial Robots, 10th International Symposium on Industrial Robots 5th International Conference on Industrial Robot Technology, 1980, 535.
- [5] 刘兴良, 机器人基础知识, 即将出版.
- [6] Pugh, A., Robotic Technology, 1984.
- [7] 渡边 茂监修, 日本产业用机械人工业会编, 产业机械人的原理, 赵平译, 台隆书店, 1982.
- [8] Юревич, E. И., Управление роботами от ЭВМ, 1980.
- [9] Dorf, R. C., Robotics and Automated Manufacturing, 1983.
- [10] Tol, J., Design and Analysis of Pulse-Width Modulated Amplifiers for DC Servo Systems *IEEE Trans. Ind. Electron Control Instrum*, 23(1976), 45—55.
- [11] Hans Gross, Electrical Feed Drives for Mechanic Tools, 1983.
- [12] Paul, R. P., Robot Manipulators: Mathematics, Programming, and Control, 1981.
- [13] Кулешов, В. С., Проектирование Следящих Систем Двустороннего Действия, 1980年.
- [14] 高井宏幸, 工业机械人的结构与应用, 一机部自动化所译, 机械工业出版社, 1977.
- [15] Lee, C. S. G., On the Control of Robot Manipulator, Robotics and Robot Sensing Systems, 58—83.
- [16] Proceedings of the 1st International Conference on Robot Vision and Sensory Control, 1981.

THE CONTROL SYSTEM OF ROBOT

XIAO CHUNLIN, LIU XINGLIANG

(Beijing Institute of Technology)

ABSTRACT

In this paper, the character of robot control systems sensor, controller and driver is briefly described. The development of robot control systems is roughly commented. The development of robot control systems is roughly commented.

全国自然科学名词审定委员会 中国自动化学会 自动化名词审定委员会在京成立

中国自动化学会第四次全国代表大会以后,新的名词工作委员会已于1986年4月底宣告成立。中国自动化学会 and 全国自然科学名词审定委员会商定,这个名词审定委员会就是全国自然科学名词审定委员会下属的自动化名词审定委员会。

新的名词审定委员会由中国自动化学会理事王子平(北京工业学院)任主任,挂靠在北京工业学院,并由理事万百五(西安交通大学)、薛景瑄(中国科学院高能物理所)任副主任,有委员21人。此外并聘请疏松桂、蔡昌年、郑维敏、王发庆等四人为顾问。

会上委员们商讨并通过了委员会的工作条例、86年工作计划以及第一批600多条自动化专门术语的审定工作,研究了学会提出的编纂自动化术语词典的工作。

与会同志认识到名词审定工作是一项极为重要的基础性工作,应尽快实现名词术语的标准化、规范化,以适应我国科学技术事业发展和对外交流的需要。会上初审通过的第一批600多条名词的草案(征求意见稿),将在整理后分送各位顾问及有关单位和专家审阅,并广泛征求意见,在汇总各方面的意见后,将再次进行修改和补充。

(万百五)