

目 录

第一章 绪 论	1
第一节 概 述	1
第二节 开环控制系统与闭环控制系统	2
第三节 自动控制系统的基本组成及表达式	6
第四节 反馈控制系统举例	7
第五节 反馈控制系统的动态过程及要求	16
习 题	17
第二章 自动控制系统的数学模型	18
第一节 概 述	18
第二节 拉普拉斯变换	19
第三节 利用拉氏变换求解微分方程	27
第四节 传递函数	32
第五节 典型环节及其传递函数	34
第六节 系统方框图运算	46
第七节 用解析法求解物理系统传递函数的实例	54
第八节 信号流程图	63
习 题	66
第三章 自动控制系统的时域分析	68
第一节 概 述	68
第二节 二阶系统的瞬态响应	69
第三节 高阶系统的瞬态响应	79
第四节 控制系统的稳定性分析	81
第五节 控制系统的误差分析和计算	87
第六节 控制系统的计算机仿真	97
习 题	105
第四章 根轨迹法	107
第一节 根轨迹法的基本概念	107
第二节 根轨迹的相角条件和幅值条件	108
第三节 根轨迹图的绘制法则	109
第四节 典型控制系统的根轨迹	115
第五节 用根轨迹法分析系统的瞬态特性	127
第六节 用根轨迹法设计系统	131
习 题	148
第五章 频率响应法	151

第一节	频率响应特性的基本概念	151
第二节	典型环节的频率特性	154
第三节	系统开环频率特性	162
第四节	用频率特性分析系统的稳定性	166
第五节	闭环系统的频率特性	175
第六节	用频率法分析系统	181
第七节	用频率法设计系统	187
第八节	用实验法求线性系统的传递函数——系统辨识	206
习 题		208
第六章	非线性控制系统	210
第一节	概 述	210
第二节	描述函数法	213
第三节	相平面分析法	222
习 题		230
第七章	计算机控制系统	232
第一节	概 述	232
第二节	信号的采样和恢复	236
第三节	差分方程及 Z 变换	243
第四节	脉冲传递函数	253
第五节	计算机控制系统的分析	261
第六节	计算机控制系统的校正和设计	272
第七节	工业机器人的计算机控制	287
习 题		296
第八章	现代控制理论基础	298
第一节	概 述	298
第二节	状态空间分析法	298
第三节	最优控制系统	310
第四节	自适应控制简介	316
习 题		318
参考文献		320

第一章 绪 论

第一节 概 述

在工业、农业、国防和科学技术实现现代化的过程中，自动控制起着重要作用。除了在宇宙航行、导弹制导、飞机和舰艇的驾驶，雷达、以及火炮瞄准等国防尖端技术中，自动控制具有特殊的重要作用之外，自动控制还在国民经济各个领域中得到广泛的应用。例如，机床加工的自动控制、发电站电压和频率的自动控制，在生产过程中对温度、压力、流量、电流、电压、位置、速度和加速度的自动控制，交通运输的自动控制，以及工程机械、工业机器人和智能机器人的自动控制等等，都广泛地应用着自动控制装置。

所谓自动控制是相对于人工控制而言的，就是在没有人直接参与的情况下，利用控制装置使生产过程或被控对象的某一物理量（输出量）准确地按照给定的规律（输入量）运行或变化。因此，如何使输出量（或被控量）按照给定的变化规律而变化，这就是自动控制工程所要解决的基本问题。

在许多场合，自动控制比人工操作能够更好地完成生产任务，甚至能够完成人工操作所不能完成的任务。自动控制技术的应用，不仅使生产过程实现了自动化，极大地提高了劳动生产率，提高了产品的质量和数量，而且减轻了人们的劳动强度，使人们从繁重的劳动中解放出来，去从事更有效的劳动。由于近代科学技术的发展，许多生产过程依靠人们的脑力和体力直接操作是难以实现的，还有许多生产过程则因人的生理所限而不能由人工操作，如原子能生产，深水作业以及火箭或导弹的制导等等。在这种情况下，自动控制更加显示出其巨大的作用。然而，自动控制都是受人工操作的启发而实现的。

自动控制是一门技术科学，是以解决生产实践问题开始的。因此，“工程控制论”首先建立。后来发现生物的生命现象中的一些问题也可以用同样的观点来考察和分析，从而使生物科学发生重大突破，建立了“生物控制论”。用自动控制的基本原理和方法，去观察、分析经济和社会的发展，同样使这两门学科的面貌焕然一新，形成崭新的“经济控制论”和“社会控制论”。这四门学科总称“控制论”。

自动控制是一门介于许多学科之间的边缘学科。它从许多不同学科领域中汲取知识，把原来认为是各自独立的学科汇集起来，同时又渗透到许多学科领域之中，去解决各种生产技术问题，经济问题以及社会问题。今天，自动控制是最活跃、最有前途的学术领域之一。

尽管早在两千年以前，我国就发明了开环自动控制系统——指南车；1089年我国又发明了闭环控制系统——水运仪象台；18世纪英国J·瓦特发明了蒸汽机离心调速器；这些都是光辉的自动控制装置。但是，自动控制发展成一门科学还经历了漫长的道路。1932年奈魁斯特(H·Nyquist)提出了频率响应法，1948年伊万斯(W·R·Evans)提出了根轨迹法，直到50年代，自动控制才形成比较完整的理论体系，称之为经典控制理论。六十年代以后，由于宇航等近代科学技术发展的需要，同时，由于电子计算机的高度发展提供了必要的手段，使得自动控制理论又发展到一个崭新的阶段——现代控制理论，并成功地应用于航天、航空

和人工智能等领域中。

由于近代计算机科学的发展,计算机的运行速度和工作可靠性不断提高,造价大幅度降低,使计算机直接参与控制不仅已成为现实,而且日益广泛。计算机控制不仅在国防、航天等领域得到应用,而且推广到机床、工业机器人、工程机械、铁道线路大修机械、施工机械以及钢铁冶炼和轧制等广阔的民用工业领域。计算机的引入使自动控制工程进入到一个更高的阶段。

我国科学家钱学森早在1954年出版了“工程控制论”一书,这是世界上最早的控制理论专著之一,为控制理论的发展作出了卓越的贡献。

经典控制理论是以拉普拉斯变换为数学工具,主要在频率域或复数域内对单输入-单输出系统进行分析与设计的一种理论。现代控制理论是以矩阵为数学工具,在时域内对多输入、多输出系统、时变系统等复杂系统进行分析与设计的一种理论。它的研究方法为状态空间法。近代控制理论克服了经典控制理论的局限性,解决了经典控制理论所难以解决的问题。但是,两者各具千秋,现代控制理论不能取代经典控制理论。工程技术界中的大量问题,仍然需要用经典控制理论来解决。

本书主要介绍经典控制理论及其在机械工程中的应用,使读者在较少的学时中,学会对单输入-单输出系统的分析和设计,以及计算机控制系统的分析和设计。此外,还要介绍现代控制理论基础。

第二节 开环控制系统与闭环控制系统

控制系统按其结构型式可分为开环控制系统、闭环控制系统和复合控制系统三种。现以机械工程中常用的液压传动系统和电力传动系统为例,来说明开环控制和闭环控制。

一、液压传动系统

(一) 开环控制系统

图1—1(a)是用普通液压阀控制的液压传动系统。电磁换向阀4将油箱1和液压泵2来的压力油送往液压缸5,从而控制液压缸的运动。换向阀4的阀芯有左、中、右三个位置。电磁换向阀4与行程开关6相配合,可以使缸体带动负载以某一恒定速度左右往复运动。也可以用手动按钮(图中未画出)控制电磁铁1DT和2DT的动作,使缸体和负载在行程中间的某一位置停止运动。这种系统称为开环控制系统。图1—1(b)表示这种系统的输入量与输出量之间的信号传递关系,称之为职能方框图。

对于这种系统,如果要求负载在其行程中的某一位置精确定位,或者要求负载以某一给定规律作变速运行,则图1—1所示系统是难以实现的。此外,该系统若有外力或液压缸漏油等干扰,负载将产生位移,引起误差,系统自身没有纠正这种误差的能力。即使这种系统的控制元件1DT和2DT采用推力可调式的直流电磁铁,使阀芯可在其行程中间的任意位置(而不是三个位置)停止,利用阀口节流与溢流阀3相配合,可以实现无级调速,可使系统由开关控制变为连续控制。然而,要想使该系统自身具有纠正误差的能力,实现精确定位,则仍然是困难的。若能方便地实现上述要求,常常能使生产飞速发展。闭环控制系统就能很好地满足上述要求。

(二) 闭环控制系统

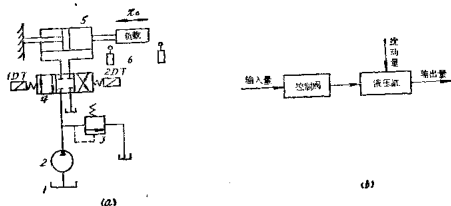


图 1-1 液压缸的开环控制

图1—2(a)所示系统是闭环控制系统，其结构特点有二：一是阀体和缸体牢固地连成一体；二是当阀芯处于阀体的中央位置时，阀芯上的两凸肩恰好遮盖住阀体上通向液压缸的两个阀口，这种阀称为零遮盖阀或零开口阀。图2—2(a)中1、2、3和4为四个控制边，控制液压缸的进、排油路。因此，这种阀又叫做四边滑阀。

在图1—2(a)中，当阀芯输入 $x_c = 0$ 时，阀芯处于中位，液压缸的进、排油路都被阀芯遮盖住，缸体不动。若向阀芯输入一个向右移动的信号 δ ，即输入量 $x_c = \delta$ ，则液压缸的进、排油路都相应打开 δ 开口，压力油经控制边3进入液压缸的大腔，小腔的油经控制边1排回油箱；缸体一面带动负载向右移动（输出），一面又带动阀体向右移动，使阀口开度 δ 减小。这种使输出量反馈到输入端并和输入量相减的系统，称为负反馈系统。当缸体向右的位移量达到 δ 时，即输出量 $x_c = \delta$ 时，控制边3和1的阀口重新关闭，迫使缸体停止运动。如果阀芯向左移动 δ 距离，即 $x_c = -\delta$ ，则阀芯的控制边2和4打开进、排油路，使缸体带动负载向左移动 δ 距离，然后停止运动。这个过程是在极短暂的时间内完成的。因此可以说，阀芯向那个方向运动，负载就向那个方向运动；阀芯位移多少，负载就位移多少；阀芯运动多快，负载就运动多快；阀芯停止运动，负载也就停止运动。所以，这种控制系统称为随动系统或伺服系统。这种系统的方框图如图1—2(b)所示。由图可知，这种系统的信号传递是封闭的，故又称为闭环控制系统。

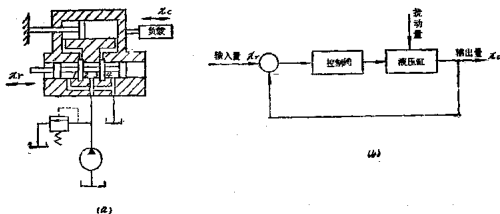


图 1—2 液压缸的闭环控制

若将图1—2所示液压伺服系统的输入、输出和负载加以不同的具体化,就可以构成各种不同用途的液压伺服系统,解决许多过去难以解决的问题;如果输入端放置一个靠模,负载是车刀、铣刀或刨刀,就组成液压仿形车床、仿形铣床或仿形刨床。靠模轻轻推动阀芯(输入信号),加工出靠模所规定的形状和尺寸的机件,解决了精度高、形状复杂的机件加工问题。例如各种台阶轴、凸轮轴,气轮机和变扭器叶片,以及车轮踏面的加工等。如果图1—2中的负载是导向轮或机舵,输入端是方向盘或操纵杆,就组成大型装载机、叉车、汽车和拖拉机的转向助力器,或飞机、船舶的操纵系统,解决了由于载重大、行速高带来的操纵力太大,人力无法操纵的问题。如果图1—2中的负载是燃油控制阀门,输入为某给定值,该值与飞锤(和发动机输出轴相连)的位移相比较后,将差值输入系统,则构成发动机调速器。如果图1—2中的输入信号是电压,输出位移由位移传感器变为电压,反送到输入端,与输入信号比较后,再输入给系统,这就是电液伺服系统。电液伺服控制在工业、交通上的应用更是广泛。

在这些系统中起关键作用的控制阀称为液压随动阀或伺服阀。伺服阀的输入信号 x ,是很微弱的,而其输出功率则很大(能源是液压泵)。故伺服阀又称放大器。液压伺服阀的输入信号,可以是机械的、电气的或气动的。常见的液压仿形刀架和液压转向助力器的随动阀,其输入是机械信号;以电信号为输入信号的伺服阀称为电液伺服阀,如图1—3所示。这两种阀都是机械工程中应用很广的自动控制元件。



图1—3 (a) 随动阀; (b) 电液伺服阀。

除了上述滑阀式伺服阀之外,还有转阀式伺服阀、喷嘴—挡板伺服阀和喷嘴式伺服阀等。它们的基本工作原理与滑阀式伺服阀相似。

二、电力传动系统

(一) 开环控制系统

设有直流电动机 D 驱动某负载(未画出)转动,如图1—4所示。电动机 D 的激磁电流 i_f 恒定。当电位器给定某电压 u (输入量)时,功率放大器便产生出相应的电压 u_d ,使电动机 D 以某一转速 n (输出量)转动。当改变电位器动臂的位置时,就相应地改变了电压 u 和 u_d ,从而使电动机的转速 n 也随之相应改变。这样就达到了控制电机转速的目的。这种系统称为开环控制系统。图1—4(b)为其职能方框图。

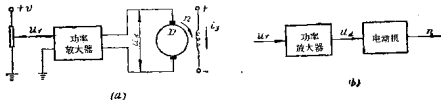


图1—4 直流电动机转速开环控制

在这种控制系统中,若有外部扰动(如电动机负载变化)或内部扰动(如可控硅的移相器特性变化)时,电动机转速将偏离给定值而产生偏差。若该偏差超过了负载转速所要求的精度,就必须用人工重新调整电位器的动臂。在这里,操作人员必须测量输出转速,并与给定转速相比较,再根据比较的差值,调整电位器动臂的位置。这对于恒速精度要求较高,而扰动又随机地频繁发生的系统来说,操作人员往往是难以胜任的。

(二) 闭环控制系统

在上述开环系统中,若在电动机输出轴上加装测速发电机 CF 时,如图1-5(a)。测速机产生与电动机 D 的输出转速 n 成正比的电压 u_f ,将 u_f 反馈到输入端,并与输入量 u_r 相比较,所得差值 Δu 经功率放大器放大后,得到电压 u_d ,从而驱动电动机旋转,构成闭环控制系统。电位器动臂位置一定,电动机转速就有一定值。其职能方框图如图1-5(b)所示。

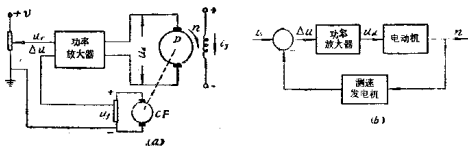


图 1-5 直流电动机转速的闭环控制

在这个闭环系统中,将电位器动臂调定到某一位置,电动机便有相应的恒值转速输出。如果由于负载突然加大,使电动机转速降低,则测速发电机输出的反馈电压 u_f 将随之降低,其值与输入电压 u_r 相比较得出的偏差电压 Δu 便增大,从而自动使电动机转速增加,以减小或消除由于负载加大所引起的电动机转速下降。

三、开环控制系统与闭环控制系统之比较

综上所述,从结构上来说,开环控制系统只有输入量对输出量起控制作用(称为顺馈控制),即只有从输入端到输出端(从左向右)的信号传递通道(称为前向通道)。在闭环控制系统中,除了具有前向通道之外,还必须具有从输出端向输入端(从右向左)的信号传递通道(称为反馈通道)。反馈通道常有检测装置(如测速电机)将输出量直接或间接加以测量,并将测量所得数值转变为与输入量相同的物理量,以便与输入量进行比较,得出偏差信号。这个偏差信号经放大后,去驱动执行机构,从而对被控制量进行控制,使之向减小该偏差的方向变化。这种利用偏差信号来驱动执行机构的系统,称为按偏差控制系统。自动控制的过程就是不断发生偏差,又不断自动纠正偏差的过程。

从控制性能上来说,由于有了负反馈,使系统具有自动纠正输出量与其希望值(输入量)之间的误差的能力,而不论该误差是怎样产生的。这样就使控制得以自动化,并提高了控制精度。开环控制没有自动纠正误差的能力,因而在有干扰的情况下,其控制精度较低。

闭环控制和开环控制的根本区别在于负反馈。有了负反馈,才使闭环控制系统具有了自动纠正误差、自动跟踪或复现输入的能力。同时应指出,负反馈可能导致系统不稳定,甚至

使系统无法工作。故自动控制系统的稳定性分析始终是系统设计的重要课题。

反馈控制原理不仅是工程控制论的理论基础,也是生物控制论、经济控制论和社会控制论的理论基础。

四、复合控制系统

复合控制系统是在反馈控制的基础上加前馈控制的系统,如图1—6所示。它与仅用负反馈控制系统相比,具有反应快、精度高,而且工作可靠等优点,详见第三章第五节。

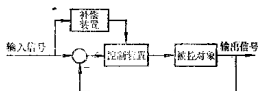


图1—6 复合控制系统职能方框图

第三节 自动控制系统的基本组成及表达式

一、基本组成

自动控制系统通常是指闭环控制系统,主要有检测元件,比较元件,放大、转换元件,校正元件,执行元件和被控对象等组成,如图1—7所示。

(一) 检测元件。常用的检测元件还有各种传感器,如温度、压力、位移、速度和加速度等传感器。检测元件的精度和性能直接影响控制系统的控制品质。因此,一般要求它的精度较高、反应灵敏、性能稳定。

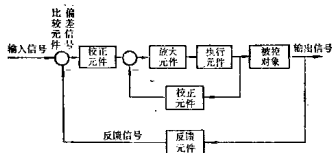


图1—7 自动控制系统的基本组成

(二) 比较元件对系统的输出量和输入量进行代数运算,并给出偏差信号。这个作用往往由综合电路(如图1—5),或检测元件自身(如自整角机、旋转变压器等),或机械差动装置(如图1—2中的滑阀)等来完成。

(三) 放大元件将微弱的偏差信号进行放大和转换,使之成为适合于执行机构需要的信号。如图1—5中的放大器和可控硅放大器,以及图1—2中的液压伺服阀等。

(四) 校正元件用来改善系统的控制性能。

比较元件、放大元件和校正元件合在一起称为控制装置。

(五) 执行元件接受放大和转换器的输出信号,对被控对象执行控制任务,使被控制量达到所要求的变化规律。如图1—5中的电动机和图1—2中的液压缸等。

(六) 被控对象是指要进行控制的机器、设备或生产过程,即负载,它的输出量就是系统的被控制量。

二、自动控制系统的表达式

在工程应用上,对自动控制系统只作上述定性的描述和分析是远远不够的,还必须作数学描述,进行定量分析。这就要求建立系统的数学表达式。通常,自动控制系统用函数方框图(简称方框图)表示。函数方框图除了与纯数学表达式(通常是一组微分方程)等效之外,还具有简明表示系统实际运行过程的优点。此外,对于我们要着重研究的线性系统来

说, 只要把组成系统的每个元件或部件的方框图按信号的传递顺序连接起来, 就很容易地构成整个系统的总方框图。下面介绍控制系统的基本方框图。

比较元件的作用是从输入量 R 中减去反馈信号 C 。设其偏差信号为 E , 则这个运算的数学关系式为:

$$E = R - C \quad (1-1)$$

这种关系在方框图中用图 1-8 (a) 表示。图中的圆表示加减运算符号; 指向圆的箭头表示输入量; 离开圆的箭头表示输出量。每个箭头上的“+”或“-”号, 表示相加或相减。“+”号可以省略。

送入控制装置的信号 E 和被控变量(系统输出量) C 之间关系用下式表示:

$$C = G(s) \cdot E \quad (1-2)$$

式中, $G(s)$ 为控制装置的运算式或函数式 (详见第二章第四节)。

这种数学关系用图 1-8 (b) 所示的方框图来表示。图中的方框表示乘法运算符号。方框里填以描述所讨论装置的函数式, 则任何线性系统的数学表达式都可以用方框图的形式来表示。把图 1-8 中的 (a) 和 (b) 图相对应量连接起来, 就是单位反馈系统的完整的方框图, 如图 1-9 所示。

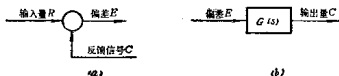


图 1-8

当描述反馈装置的函数为 $H(s)$ 时, 就构成更一般形式的反馈系统方框图, 如图 1-10 所示。反馈信号 B 为:

$$B = H(s) \cdot C \quad (1-3)$$

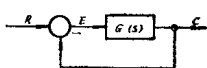


图 1-9 单位反馈系统的方框图

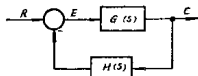


图 1-10 反馈控制系统的方框图

与职能方框图相比, 函数方框图具有了定量描述系统的意义。系统的函数方框图有自己的运算规律, 我们将在第二章中详述。

第四节 反馈控制系统举例

一、仿形刀架的液压伺服系统

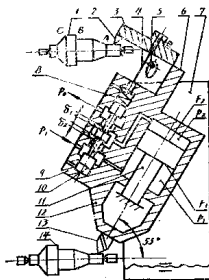
仿形刀架可以自动加工出台阶轴类零件或具有曲线轮廓的旋转面工件, 加工精度较高, 生产率高, 适用于大批量生产, 应用很广。如图 1-11 所示的 YFD₄A 形仿形刀架。

(一) 结构特点

差动缸缸体12和伺服阀阀体9是一体的, 刀具13固装在缸体12上。缸体装在纵向溜板7上的导轨上, 并可沿导轨自由移动。导轨与床身成 55° 或 90° 夹角。活塞杆11固装在溜板7上。

钢丝4把阀芯10和顶尖板3固定在一起。顶尖板一端装有顶尖2, 另一端用十字弹簧片6连在阀体9上。这样, 顶尖板3便可相对于阀体微微摆动, 而顶尖2在弹簧8和十字弹簧片6的作用下, 总有压向靠模1的趋势。其压力一般小于10N。

压力油 p_1 进入伺服阀后, 一路直通差动缸缸体12的小腔, 其大腔一面经间隙 δ_1 和回油路相通, 一面经间隙 δ_2 和压力油相通。该阀是两个控制边的正开口阀。



置级阀是对称的双喷嘴挡板阀。功率级是一个四边滑阀。阀芯9有三个凸肩，中间凸肩与反馈杆3的端部小球4相铰接，构成反馈连接。力矩马达由永磁钢1、导磁体6、衔铁7和线圈5等组成。它的作用是将输入电流转变成为使衔铁7旋转的力矩。衔铁7支承在弹簧管2上。衔铁7、弹簧管2、反馈杆3和其下端小球4都成刚性连接，反馈杆兼起挡板作用，故称衔铁挡板组件。

永磁钢1产生的磁通 ϕ_r 在气隙a、b、c和d中的方向都是向下的，而线圈5通电流后产生的磁通 ϕ_c 在各气隙中的方向是不同的。如果线圈5不通电流，则四个气隙相等，通过的磁力线相同，衔铁7受力平衡，静止不动。挡板3在两对称的喷嘴8的中位，两喷嘴和挡板之间的间隙相等，左、右两固定节流孔10相等，左、右两路压力油经孔10和喷嘴8流回油箱时形成的 p_1 和 p_2 相等，阀芯9处在中位不动。

当线圈5按图示方向输入信号电流 I 时，在气隙b和c中，磁通 ϕ_r 和 ϕ_c 的方向相同，总磁通是相加的；在气隙a和d中，磁通 ϕ_r 与 ϕ_c 的方向相反，总磁通是相减的。因此，衔铁7在磁场中受到一个逆时针的旋转力矩，并克服弹簧管2的弹力，带动挡板3一起逆时针转动，使挡板3与右喷嘴8的间隙减小、挡板与左喷嘴的间隙增大，使 $p_2 > p_1$ ，阀芯9左移。阀芯9左移时，一面打开控制阀口①和②，使高压油 p_r 经口②送往负载，负载的回油经口①回到油箱；一面通过钢球4带动反馈杆3向左弯曲，给衔铁-挡板组件施加顺时针力矩，去反抗电磁力矩，称为反馈力矩，直到组件、阀芯9平衡，不再左移。这时，阀口①和②有一个开度，与此相应，伺服阀有一个流量输出。

这样，阀芯9的位移，挡板3的位移，力矩马达输出的力矩，以及输入信号电流 I ，都依次成正比。在负载压力降一定时，阀的输出流量也与电流信号 I 成正比。调节 I 的大小，便可调节阀的输出流量； $I=0$ 时，输出流量为零； I 换向，输出流量也换向。

三、位置伺服控制系统

图1—13为电液伺服位置控制系统工作原理。其控制目的是使工作台的位置按指令电位计给定的规律变化。指令电位计的动臂把输入转角 θ_i 转换成输入电压 u_i 。工作台的位置通过齿条、齿轮和反馈轴由反馈电位计的动臂转角 θ_o 检测，并转换成电压 u_o 。两个电位计成桥式连接，构成比较元件。

当工作台的位置与指令信号位置没有偏差时，即 $\theta_o = \theta_i$ ，相应的电压 $u_o = u_i$ ，桥式电路得到的偏差电压 $\Delta u = u_i - u_o = 0$ ，工作台静止不动。若突然给一个指令信号 $\Delta \theta_i$ ，相应的电压增量为 Δu_i ，设 $\Delta u_i = 15V$ ，则在工作台还来不及移动的瞬间，反馈电压增量 $\Delta u_o = 0$ ，电桥电路的偏差电压 $\Delta u = 15 - 0 = 15V$ ，该偏差电压经放大器放大、并转换成电流信号 i 去驱动电液伺服阀，使阀口打开一个相应的开度，输出压力油，推动液压缸和工作台移动。工作台移动又使反馈轴转角增大 $\Delta \theta_o$ ，相应的反馈电压亦增大 Δu_o 。 Δu_o 和 $\Delta \theta_o$ 增大意味着电桥电路

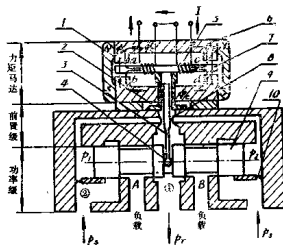


图1—12 QDY电液伺服阀

的偏差电压 Δu 减小, 以及工作台与指令信号的位置偏差减小。而 Δu 减小则意味着阀口开度减小。直到 Δu 增大到15V时, $\Delta u = 15 - 15 = 0$, 阀口重新关闭, 工作台停止移动。这时, $\Delta \theta_c = \Delta \theta$, 输出完全复现输入。如果指令电位计的动臂不断地按给定规律运动, 则工作台亦随之按该给定规律运动, 实现了对工作台控制的目的。

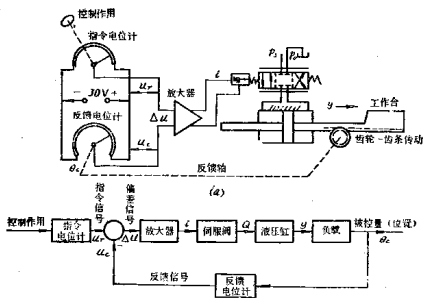


图 1-13 电液伺服位置控制系统

应当指出, 负反馈使阀口关闭的过程, 是抑制工作台运动的过程。如果负载的动能很大, 由于油液的可压缩性, 导致当 $\Delta u = 0$ 时, 工作台不能立即停止运动而向前冲一段。工作台前冲, 负反馈将使偏差电压 Δu 变为负值, 电流 i 换向, 阀芯位移换向, 从而向液压缸反向输送压力油, 迫使液压缸活塞和负载反向运动, 形成振荡。若这种反向输送的压力油的能量小于该系统的磨损和漏油等消散的能量, 则这种振荡是衰减的, 直到工作台停止运动。如反向输入系统的能量大于系统消散的能量, 则系统的振荡将加剧, 造成系统不能稳定。这就是负反馈控制容易引起系统不稳的物理实质。

四、发动机转速控制系统

许多发动机, 如汽轮机、水轮机和机车柴油机等, 都可用来驱动发电机, 而发电机的转速直接影响发电品质。要保证发电品质良好、稳定, 必须保证发动机转速按调定速度稳定地运行。因此, 发动机的转速控制历来受到人们的重视。

图 1-14 是用于控制发动机转速的飞锤式离心调速器示意图。飞锤底座用齿轮直接与发动机输出轴相连。故飞锤的转速正比于发动机的转速。速度控制系统的目标是使发动机准确地按其调定速度运转。设图示状态时, 系统处于稳定状态, 调速杆作用于弹簧上座的力和飞锤离心力通过杠杆、枢轴作用于弹簧下座的力相等, 图中所有小写字母所表示的参数均为零, 发动机以调速杆所指的2000r/min的转速稳定运行。

若发动机负载突然加大, 则发动机转速将下降而低于调定值, 飞锤离心力减小, 从而使弹簧下座上的向上力减小, 破坏力平衡而产生 x 下移、 e 下移, 伺服阀阀口开启, 压力油 p 流入液压缸下腔, 上腔排油, 使 y 上移。 y 上移一面加大流量控制阀的开度, 使发动机转速

增大，直到调定速度；一面通过反馈杆使伺服阀口减小，直到完全关闭。这时，作用于弹簧上、下座的力再一次达到平衡，发动机便以调定速度稳定运行。

若发动机负载突然减小，发动机转速增大，则飞锤离心力增大，使 x 上移、 y 下移，减小流量控制阀的开度，使发动机转速下降，直到调定速度，系统呈现新的平衡状态。若调整调速杆指针的位置，便可调节发动机的期望转速（调定速度）。

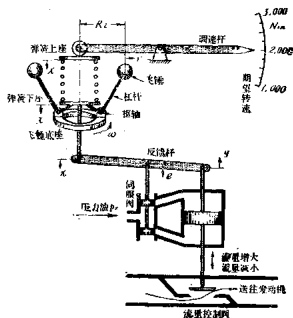


图 1-14 发动机调速系统

图 1-14 所示系统是闭环系统。上述定性分析好象没有什么问题。实际上，这个系统存在着明显的滞后现象。例如，若流量控制阀控制的是燃料油，则燃料油送到燃烧室、燃烧爆炸、冲击压力作用于发动机活塞克服运动部件的惯性和摩擦力而提高转速等过程，都需要一定时间，这就是滞后。这种滞后将引起系统超调，甚至不稳定。这种超调是多大？如何使它不超过规定值？解决这些问题就需要对系统进行定量分析，并对系统进行校正。

五、数学控制系统

图 1-15 为数字程序控制机床的工作原理图。其控制目的是控制刀具的位置，以便加工出在形状和尺寸方面都满足数字程序所规定的产品来。刀具的位置由位置传感器检测。其输出是电压，需经模-数转换器变为脉冲信号反送到输入端的控制器。在加工之前，根据工件 P 的加工图，编制加工程序，并把程序指令记录在穿孔纸带上。加工时，由光电阅读器将纸带上的程序指令变成调频脉冲信号送入控制器，与反馈脉冲相比较，其差值经数-模转换器将脉冲信号转换成模拟信号（通常是电压），再经放大器放大后，驱动伺服马达转动，进而控制刀具运动，进行切削加工。图中测速发电机是为改善系统的动态特性而设置的速度反馈装置。这个系统显然是闭环系统。

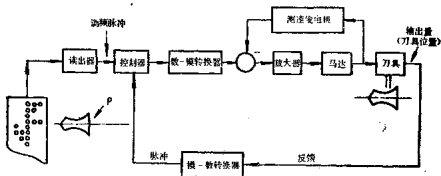


图 1-15 数字程序控制机床工作原理

六、计算机控制系统

(一) 液压凿岩台车钻臂的计算机控制

每辆凿岩台车上装有 2~4 个钻臂。每台钻臂与一般工业机器人相似。都是用计算机控制多个执行机构的复合运动。不过，钻臂肩负着按给定的炮眼分布位置，在隧道横断面上，准确、平行、等深度地钻孔。

图 1—16 为一只钻臂的计算机控制示意图。钻臂 7 安装在车架 4 上，凿岩机 11 在推进器 12 的导轨上，由推进缸推送，用钎杆 13 和钻头 15 对岩石进行凿钻。推进器 12 的位置和方向由摆动缸 6、伸缩缸 9、导向缸 10 和翻转缸 14 等液压缸的复合运动来确定。

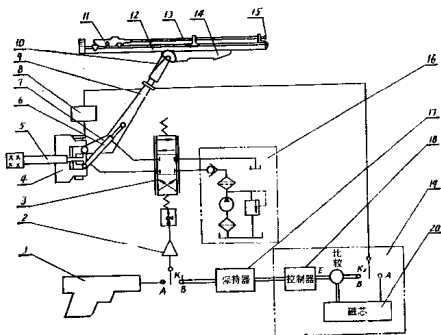


图 1—16 钻臂的计算机控制

因为隧道开挖作业的随机因素较多，钻臂宜采用示教再现式计算机控制，以便人工随时皆可进行干预。在这种系统中，阀控缸是系统的执行机构；计算机 19 起记忆、比较、数值计算和控制的功能；编码器 8 是检测装置，用来将钻臂的角位移直接转换成二进制数码，送入计算机；保持器 17 将计算机输出的数字信号转换成伺服阀 3 能够接受的连续模拟信号；示教器 1 是人工控制器，其输出是连续模拟电信号。

在示教时，开关 K_1 与 A 闭合，系统呈现开环状态。人工操作示教器，将模拟电信号经放大器 2 送入电液伺服阀 3，驱动俯仰缸 6，使钻臂 7 旋转。停止输入信号时，钻臂就停止转动。此时，开关 K_1 和 K_2 都与 B 闭合，系统呈现闭环状态，以防止因伺服阀 3 的零漂而引起钻臂位置漂移。示教时，按下示教器上的记录按钮，使 K_2 和 A 闭合，可把由编码器 8 来的反映钻臂位置的数字信号，送入存储器 20，贮存起来，这就是示教过程。

再现时，开关 K_1 和 K_2 都与 B 闭合，系统呈现闭环状态。按动再现按钮，计算机 19 便依次从存储器 20 中，取出存入的钻臂位置信号。每取一个信号便和编码器 8 测得的信号进行比较，其差值 E 经控制器 18 和保持器 17 转换为连续模拟信号，经放大器送入伺服阀 3，驱动缸

6 带动钻臂 7 旋转,使 E 减小,直到 E 值为零,钻臂 7 便再现了示教过的位置。当存入计算机的信息全部输出后,钻臂就完全复现了示教过程所经历过的位置。当然,也可以用编好的程序直接存入存储器 20 中来取代示教过程。

以上只是计算机控制俯吊缸的情况。而钻臂的运动是俯吊缸、摆动缸等多个缸的合成运动。图 1—17 所示为计算机控制多缸工作的原理图。对每个缸来说,计算机都要从存储器中取出原来存入的数字信息 α_i ,同时,采样开关从编码器输出端取来反映现时钻臂转角 θ_i 的数字信息,两者相比较,得出差值 E_i ,再按事先编好的程序进行数值计算,输出控制信息 R_i ,经数-模转换后去驱动阀控俯吊缸。这就是说,计算机需要经过采样、数值计算和输出信号三个步骤。从第一次采样到下一次采样的间隔时间通常是相等的,称为采样周期 T 。由于计算机的运算速度非常快,完成对一个缸控制所需的时间相对于采样周期 T 来说是极短的。若只控制一个缸,则计算机的踏步时间将远远大于其工作时间。因此,计算机有能力同时控制几个、甚至几百个执行机构。这时,计算机在一个采样周期内,从第一个缸开始,逐个进行采样、计算和输出信号,直到最后一个缸。在下一个采样周期内,计算机重复运行。这样,计算机周而复始地工作,使每个缸每隔 T_s 便被采样一次(称为巡回采样),并获得一次控制信号。每个缸从计算机获得控制信号的时间是错开的,故称分时控制。但是,因为 T 很短,加上 D/A 转换器的作用,就使每个缸不断获得所需要的连续模拟控制信号,以实现存储器中的程序所规定的钻臂位置。

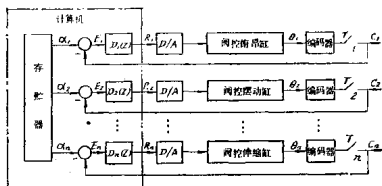


图 1—17 计算机控制多缸的原理

由此可见,计算机对多缸控制是依靠巡回采样和分时控制实现的。

(二) 炼铁高炉的计算机控制

图 1—18 是一座炼铁高炉的计算机控制示意图。一座现代化的高炉每天生产 4000t 生铁。每生产 1t 生铁约需 2t 矿石, 1t 焦炭, 0.5t 石灰石和 4.5t 热空气 (600~900℃) 送入炉膛内。高炉的熔化过程是连续的, 必须保持高炉工作的连续性。

在熔炼过程中, 加热空气是非常重要的。必须将空气在热风炉内加热, 然后由鼓风机将热风吹进炉膛内与焦炭燃烧, 产生大量的热量。由于燃烧不完全, 在炉膛内产生大量的一氧化碳气体。炽热的一氧化碳和焦炭一起使炉内的铁矿石加热, 并还原为金属铁和炭化铁, 当温度达到 1200℃ 时开始熔化成铁水, 同时, 使炉内熔剂石灰石加热, 将杂质熔化成液态矿渣。熔化的铁水沉在炉底, 液态矿渣漂浮在铁水之上。两者定期从专用排出口排出炉外。

标志生铁质量的指标是含炭量和含锰、硅、硫、磷等元素的含量。这主要取决于所采用

的矿石、焦炭和石灰石等原料的成分。这样用人工控制铁水的化学成分是非常困难的。而采用计算机控制时，可将有关铁水、炉渣和炉顶气体等方面的成分信息，以及炉内温度、压力和矿石、焦炭、石灰石成分等信息，在一定时间内一并送入计算机内，即可确定应当送入炉渣的各种原料的最佳数量，从而保证所需的生铁成分。同时也能保证鼓风高炉在满意条件下稳定运转。

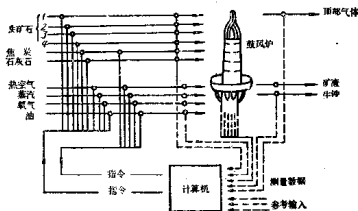


图 1-18 高炉计算机控制

应当指出，在这种计算机控制过程中，必须有一个合适的数学模型。而推导这个数学模型往往是困难的，因为所有影响因素并非都是已知的。所需的各种变量的测量也是困难的，甚至是不可能的。这时，必须用统计方法给以估计值。

很明显，这是一个多输入、多输出的例子。图 1-16 所示凿岩台车钻臂控制虽然也是计算机控制系统，也有多个输入和多个输出，但是该系统实际上是多个独立的单输入-单输出系统。单输入-单输出控制系统一般应用经典控制理论进行系统分析和系统设计；而多输入-多输出控制系统则应用现代控制理论进行系统分析和系统设计。本书主要任务是介绍单输入-单输出系统。因此，第七章计算机控制系统只是介绍多个独立的单输入-单输出系统。这种计算机控制系统在工业交通事业中应用很广。

七、钢轨连续闪光对焊机的控制系统

无缝线路可以减小轮、轨间的冲击力，改善旅客的舒适条件，延长机车、车辆和线路的寿命。采用无缝线路是铁路向大吨位、高速度方向发展的重要前提，是各国铁路现代化的重要标志之一。图 1-19 为钢轨连续闪光对焊机的控制系统结构示意图。两根被焊钢轨 18 和 19 由左、右夹钳 16 和 21 夹紧（夹钳缸未画出）。两夹钳上有高导电率的钳口 17 和 20 分别和焊接变压器 15 的次级绕组两极相连。右夹钳 21 和液压缸 23 以及伺服阀 阀体 4 三者刚性连接，构成阀控缸的直接反馈系统。像图 1-1(b) 一样，这个刚体的运动始终跟踪着阀芯 2。阀芯 2 的运动由直流伺服电动机 11 驱动。该刚体带动被焊钢轨 19 运动，控制着钢轨 18 和 19 的端面间隙和靠近速度。这个间隙决定着焊弧电流，该电流在互感器 14 产生电压 u_f ，反送给比较器 13 和输入指令电压 u 比较，得偏差值 E 。 E （经放大器 12）决定着伺服电机 11 的运动。这就是电气闭环控制系统。整个系统称为电液伺服控制系统。其方框图示于图 1-20 中。

根据接触焊原理制订出最佳焊接工艺程序，由控制器 K 发出指令电压 u ，便可自动焊出高质量钢轨焊缝。焊接过程如下：

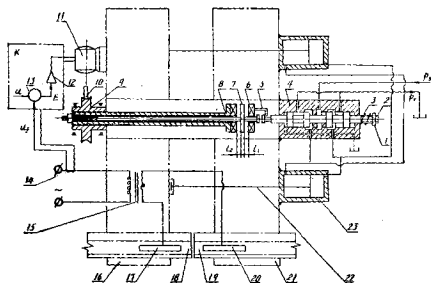


图 1-19 连续闪光钢轨对焊机

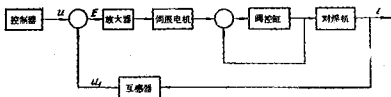


图 1-20 连续闪光焊机系统方框图

快速趋近 当按预订程序输入 u 时,起初尚无焊弧,互感器14的 $u_i = 0$, E 很大($E = u - u_i = u$),经放大器后驱动电机11顺时针高速旋转,再经蜗轮——蜗杆副9、10和丝杠——螺母副9、8转换为拉杆7、抓钩5和阀芯2的向左快速移动,并压缩弹簧3。此时,高压油经伺服阀流向液压缸23的有杆腔,无杆腔排油,缸体23和活塞杆22相互位移,迫使两夹钳16和21带动两根钢轨18和19快速靠近。

不稳定烧化 当两被焊钢轨端面靠近到出现电弧时,互感器14产生电压 u_i ,其值随焊弧电流的增大而增大,使 $E = u - u_i$ 迅速减小,电机11转速减小,伺服阀阀口开度减小,两轨靠近速度迅速减慢。由于被焊端面状态的随机性和运动部件惯性等原因,可能出现两轨端面大面积接触形成短路。这时变压器15的负载电流猛增, u_i 猛增,致使 $E = u - u_i$ 变成负值,使电机11反转,伺服阀油路换接,缸23反向运动使两钢轨接触面减小,电阻加大,电弧电流减小, u_i 也减小,又使 E 变为正值,电机11正向旋转,被焊端面接触面再度增大,焊弧电流再度增大。这样,焊弧电流时大、时小,这实际是被焊端面的烧化速度和靠近速度不相适应造成的。这时系统呈现不稳定烧化。

稳定烧化 稳定烧化将钢轨端面的随机状态减弱,温度升高,电阻增大,使焊弧电流变化幅度逐渐衰减,端面烧化速度和靠近速度逐渐相适应,系统呈现稳定烧化。这个阶段的任务是扩大加热区,使之延伸到10~15mm。

强化烧化 控制柜K中的指令器使放大器12输出电压分五级从25V提高到100V,烧化速