

控制理论和电液控制系统

(上 册)

顧 瑞 龙

一机部机床研究所

控制理论与电液控制系统

目 录

第一章	概述	1
§1.1	历史与回顾	1
§1.2	系统的名词解释、分类	3
第二章	数学基础和系统的数学描述	12
§2.1	线性化	12
§2.2	线性系统微分方程	14
§2.3	复变函数和S平面	15
§2.4	拉氏变换	17
§2.5	系统的两种数学描述法	24
第三章	传递函数和信号流图	39
§3.1	传递函数	39
§3.2	工程中各种典型的机、电、液系统的传递函数	41
§3.3	传递函数的运算	55
第四章	系统的频率响应与博德图	64
§4.1	频率响应的概念与计算	65
§4.2	奈魁斯特图	69

§4.3	博德图及典型环节的博德图	73
§4.4	系统的博德图绘制举例	87
§4.5	闭环频率响应	92
第五章	典型的电液控制元件与系统	97
§5.1	阀控液压缸与阀控液压马达	97
§5.2	泵控液压缸	104
§5.3	液压力矩放大器	106
§5.4	液压仿形刀架	108
§5.5	力反馈电液伺服阀	110
第六章	控制系统的性能准则	114
§6.1	性能准则的提出	114
§6.2	稳定性准则	115
§6.3	灵敏度	115
§6.4	瞬态响应	118
§6.5	频率响应	120
§6.6	稳态精度(稳态误差)	123
§6.7	质量指标	138
§6.8	控制系统的性能准则一览	141
第七章	稳定性分析	143
§7.1	用劳斯—霍维茨判据判定稳定性	145
§7.2	用奈魁斯特判据判定稳定性	147

§7.3	博德图上的奈魁斯特判据	150
§7.4	液压系统稳定分析示例	151
§7.5	奈魁斯特判据	156
第八章	根轨迹法	159
§8.1	根轨迹法的基本概念	159
§8.2	闭环极点和瞬态响应	161
§8.3	极点位置的选择	168
§8.4	根轨迹的作图法	180
§8.5	一个电液控制系统的根轨迹作图示例	198
§8.6	按瞬态响应要求用根轨迹法设计电液控制系统	204
第九章	位置控制系统	
§9.1	位置控制系统的特点	
§9.2	电流负反馈放大口分析	
§9.3	双电位口位置控制系统	
§9.4	伺服阀—液压缸系统	
§9.5	伺服阀—液压马达系统	
§9.6	数控机床中的高增益系统和低增益系统	
第十章	速度控制系统	
§10.1	速度控制回路中加补偿的必然性	
§10.2	速度控制系统设计示例	

§10.3	速度环和位置环控制速度的比较	-----
§10.4	出现于位置环内的速度环	-----
§10.5	速度环的阻尼作用	-----
第十一章	力控制系统	-----
§11.1	实现力控制系统时阀的选用	-----
§11.2	力环中液压缸的传递函数	-----
§11.3	材料试验机的力控制系统	-----
§11.4	轧机液压压下系统	-----
§11.5	力环的阻尼作用	-----
第十二章	控制系统的设计和补偿(校正)	-----
§12.1	设计中的几种补偿方法	-----
§12.2	用频率法分析补偿装置	-----
§12.3	用频率法分析顺馈补偿	-----
§12.4	用频率法分析反馈微分补偿	-----
§12.5	用根轨迹法分析顺馈补偿	-----
§12.6	几点说明	-----
第十三章	现代控制理论简介	-----
§13.1	系统的状态空间描述	-----
§13.2	从动态方程求系统的解	-----
§13.3	传递函数的综合——系统设计	-----
第十四章	最优控制系统的设计	-----
§14.1	求最优总传递函数	-----
§14.2	最优控制系统的实现	-----

控制理论和电液控制系统

第一章 概 述

§ 1.1 历史与回顾

近代技术的发展，使设备的自动化程度飞速提高。不仅飞机、宇宙飞船的控制，就是许多地面设备，例如数控机床、材料试验机、轧钢机等设备的控制也不可能直接而简单用手动控制，而是通过这些装备中的自动调节装置进行的。“控制工程”就是指这些自动调节装置的设计。最早期的、在工业中起重要作用的第一个自动调节装置还要数 1784 年瓦特的蒸汽机中的调速器，当汽机速度增加时，悬挂在杠杆上的飞球升高，同它联结在一起的汽阀开口减少，从而使汽机的速度下降。但是后来就发现，汽阀的速度调节并不完善，一些参数处理不好时会使汽机产生剧烈的振荡。这些缺点迫使一些数学家来思考并解决这些问题。1868 年马克斯威尔 (maxwell) 从描述这个系统的微分方程的解中有增长指数项来判断稳定性。1895 年，劳斯 (Routh) 和赫尔维茨 (Hurwitz) 导出了著名的稳定性判据，这些判据到现在还是极为有效的。第一次和第二次世界大战中武器的进展促使很多装备的自动调节装置有了飞跃的发展，他们的基础就是上述理论。在这期间由于通信的需要发明了负反馈放大器，这时劳斯——赫尔维茨的理论的实际意义又不大了，因为描述放大器的微分方程阶次太高，而“频率响应”及用图解形式处理来得更实际，奈魁斯特 (Nyquist) 于 1932 年创立了稳定判据及“稳定裕量”的概念。在它的基础上，博德 (H.W. Bode) 于 1945 年提出用图解来分析系统

合线性反馈控制系统的方法，这就是频率法与此同时，依万斯 (W. R. Evans) 于 1948 年创立了“根轨迹法”，对从微分方法模型研究问题提供了一个简单而有效的方法，在某些情况下，它比频率法更简单，更直接，这样，“古典控制理论”已比较完善地形成，在各行各业中广泛地应用这些理论，促进了控制工程的进展，1948 年，美国数学家维纳 (N. Wiener) 首创了控制论 (Cybernetics) 这个名词，他认为，到那时为止，反馈理论的进展可以解决许多生物控制机理、经济发展过程等问题。事实证明，从那以后，控制理论又有了新的发展，而跨入了“现代控制理论”的阶段。

六十年代初，美国执行“阿波罗”计划时；由于客观发展的需要比较明确地形成了所谓“现代控制理论”古典控制理论的主要缺点是：一，研究的系统限于线性时不变系统，即其部件用常系数线性常微分方程描述的系统；二，研究的系统只能是单回路的；三，只提供分析的方法，然后改进系统再进行尝试，而不能提供最好的设计。这些问题的存在促使现代控制理论的加速发展，1956 年苏联 *Понтрягин* *Понтрягин* 提出的最佳控制，1957 年美国 *Bellman* 提出的动态规划理论，和 1960 年美国 *Kalman* 提出的最佳过滤理论形成了现代控制理论的基础，状态空间的概念的引入计算机的发展及普及对现代控制理论起了极重要的推动作用。可以把古典和现代控制理论的特点作如下的简略的比较。

古典的	现代的
基本数学描述方法 传递函数(输入输出描述)	向量空间(状态空间描述)
研究方法 根轨迹法和频率法	状态空间法
研究目标 研究系统的稳定性,在给定输入和给定指标情况下研究系统的综合	揭示系统内在规律 实现在一定意义下的最佳化

必须指出,在实际工程中,古典控制理论仍是极为重要的。相当多的问题用它来解决仍是非常有效的,而且现代理论是从古典理论蜕变而来的。因此,本讲座将把较多的篇幅介绍古典理论。还要指出,现代控制理论仍处于发展之中,每个领域中仍有许多待解决的问题。

本讲座将控制理论和工程实践紧密结合起来,把电液控制系统作为研究对象,探讨理论指导系统的设计问题。假如把个别环节变化以后,本讲座对电控制系统、气动控制系统也是同样适用的。

§1.2 系统的名词解释、分类

控制理论研究的对象是各种系统,下面将对一些名词下一些定义,对系统作一些分类。

系统,将一些装置或一些计划作任何的组合以求能达到某一目的的,都叫做系统。这个定义的含义是非常广泛的。它不仅包括象用电机、电口元件或伺服阀、液压缸这样的元件组成的物理系统,而且包括一些抽象的动态现象,如在经济学、人

口学中遇到的一些现象，也就是说，经济的运行，人口的变迁都各自组成一个系统。

开环系统。在开环系统中，动作信号是预先确定的，不会变化的，而不管实际的输出是什么，例如通常的洗衣机就是这个例子（图1-1）。规定的洗衣时间一定，则机口不管衣服洗

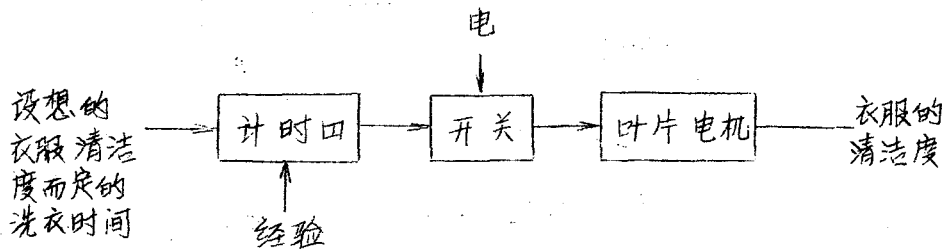


图1-1 简单洗衣机的原理图

得干净与否，到指定时间即自行停机。所以说，这个系统是开环的。

闭环系统（反馈控制系统）。在闭环系统中，动作信号是所希望信号的函数，或者是实际输出的函数。譬如厕所水箱水口的控制装置就是一个闭环系统（图1-2）。当水口达到一定水口水平时，杠杆机构就自动关闭阀的水口。从图1-2(b)中可以看出，浮子将水口的水平转变为阀的开口度。看起来这是一个简单而且一目了然的系统，但是它正是一个典型的闭环系统。它具备一个闭环系统所必需的全部组件。和一般闭环系统一样，它也有稳定性、稳态误差、瞬态过程等问题。只是因为系统的要求不严，参数又是经过考验的所以应用中很少出问题。

又如数控机厂的工作台受纸带信息的控制，用一定的速度运行。它的工作原理图见图1-3，很明显，这也是一个闭环系统。在最现代化的装置中，闭环控制系统是必不可少的，例如

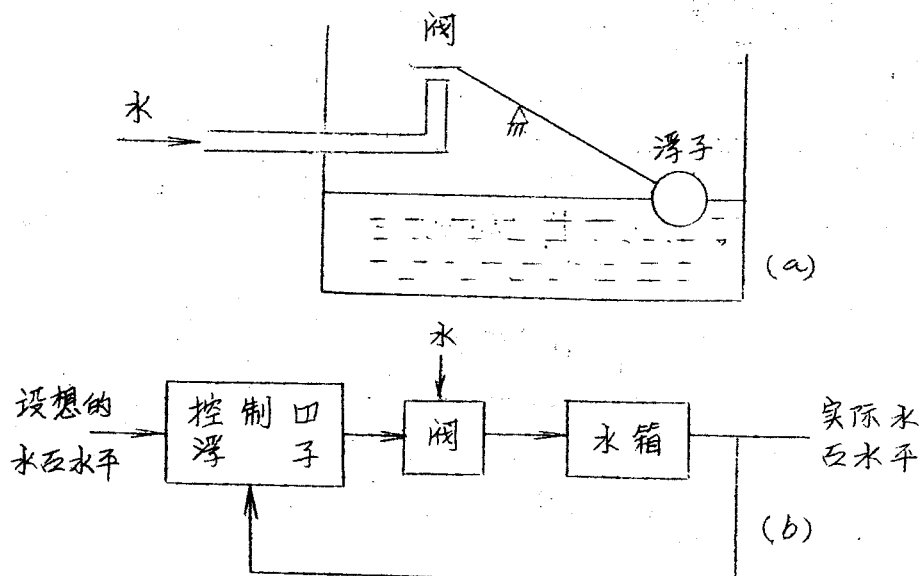


图 1-2 厕所水箱的原理图

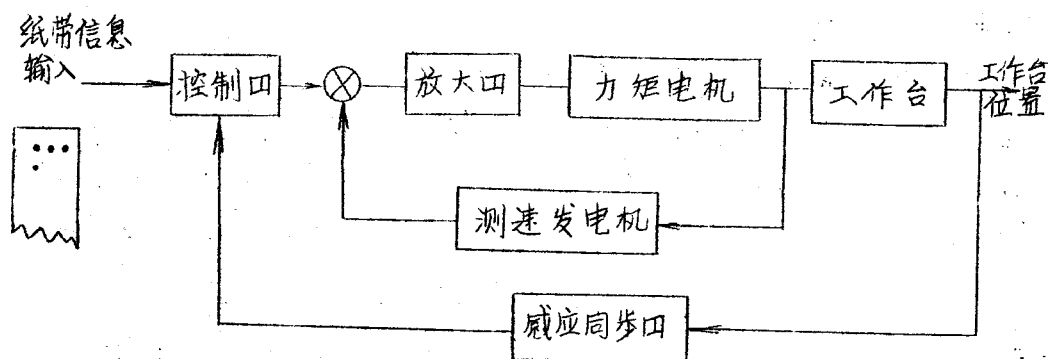


图 1-3 数控机床原理图

核发电厂的发电过程是一个较复杂的闭环系统(图 1-4)。为了保持蒸汽的压力和温度在某一水平上,有一个控制系统用于调节控制杆的位置。另外一个控制系统用于调节发电机电压,譬如说保持在 230 伏的电平上。另外还有蒸汽轮机轴的速度调

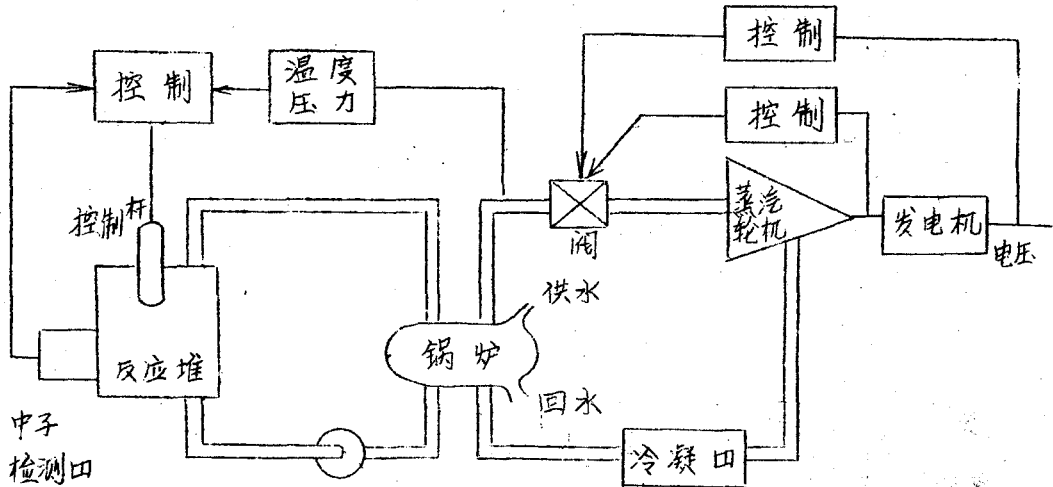


图 1-4 核电站原理图

节、锅炉中水平面的调节等控制系统，从以上这些例子可见闭环系统的应用是非常普遍的，而且一个设计得恰当的闭环系统的性能比开环系统的性能要好得多，通常按被控量的不同情况，又可将闭环控制系统分为三类：

① 伺服系统 伺服系统的被控量是指位置、速度之类的机械量，并要求这些量和输入量有一个函数关系。现在通常把力控制系统也划归这一类系统。图 1-3 所示就是伺服系统的一个例子。

② 自动调整系统 是指输出量为常量，或随时间变化得很慢的系统。这类系统的主要任务是在受到干扰时保持输出量为恒定的希望值。被控量通常为电压、电流、转速、力矩等物理量。图 1-4 所示系统就是一个例子。

③ 过程控制系统 是指输出量按已知的时间函数变化的系统，这类系统都用于化工、冶炼、造纸等工业中，被控量通常为温度、压力、液位、浓度、功率等。伺服系统往往作为

一个组成部分出现在这种系统中，还有一些其他的分类法如：

线性控制系统和非线性控制系统——凡是其元件特性呈线性特性、即符合叠加性原理的系统叫线性系统，否则就是非线性系统。必须指出，线性控制系统仅仅是理论分析者为了简化分析工作而假设的理想模型，严格地说线性系统实际上是不存在的，只有当控制系统中信号幅度限制在某一一定范围内时，系统元件才可能有线性特性，这时系统可认为基本是线性的。

时不变系统和时变系统——当控制系统的参数在工作时其参数不随时间而变的系统叫时不变系统，否则就是时变系统。运行中的宇宙飞船由于燃料损耗的变化、卷纸装备中滚筒上纸卷直径（质量）的变化，都使这些系统成为时变系统。时变系统的分析远较时不变系统的分析为复杂。

连续数据控制系统——若一个控制系统各个部分的信号是连续时间变数的函数，则这个系统就叫做连续数据控制系统或叫连续系统，这种系统中的信号又可分为交流信号和直流信号两种，交流控制系统通常指系统中交流信号是用某种方式调制过的，而直流控制系统并不是指系统中所有信号都是直流的，而是指信号不用调制，交流控制系统常用的元件有同步机交流放大器、交流电机加速度计、陀螺仪等，直流控制系统常用的元件有电位器、直流放大器、直流电机和直流测速机等，实际上，系统有时是混合地用各种元件组成，采用相应的调制解调以适应系统各点的需要。

采样数据控制系统和数字控制系统——这两种系统和连续数据控制系统不同的是，在系统的一点或某几点，信号的形式是脉冲串或数码，通常采样数据系统指的是其信号为脉冲数据的形式的系统，而数字控制系统是指系统中有数字计算机或控制机的系统，“离散数据控制系统”是泛指这两种系统。

集中参数系统——有有限数目的状态变量的系统。

确定性系统——没有噪声的系统。

本讲座将只研究线性、时不变、连续数据控制、集中参数和确定性系统，而且以电液控制系统为实例进行讨论。被研究的系统应该具有最初的方案，即执行元件应根据静态计划为已知，被控制对象应该为已知，所以可将被研究的基本问题归结如图1-5所示。

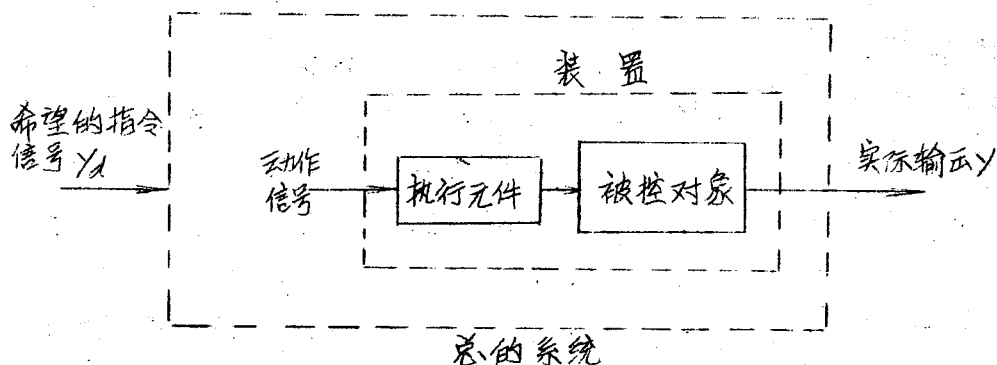


图1-5 要设计的基本问题

在结束本章之前，再看一个电液伺服系统的实例，并从这个典型系统中作出一些元件的名词解释。

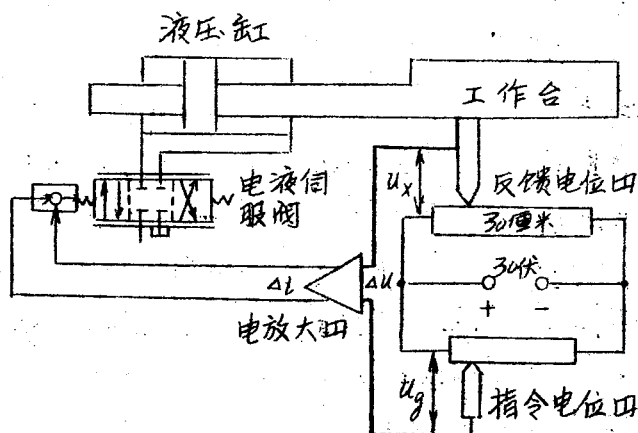


图1-6 双电位器位置控制电液伺服系统

图 1-6 为双电位器电液伺服系统的原理，该系统的控制对象是工作台，被控量是它的位置，执行元件是液压缸，现使之按照指令电位器给定的规律变化。操作者移动指令电位器滑臂，滑臂位置转换成电压 U 。被控制的工作台位置由反馈电位器检测，转换成电压 U_x 。两个电位器接成桥式电路，该电桥的输出即为 $\Delta U = U_g - U_x$ 。如果在开始时指令电位器和反馈电位器的滑臂都处于左端位置，此时 $U_g = 0$ ， $U_x = 0$ ， $\Delta U = U_g - U_x = 0$ ，没有偏差信号。若突然将指令电位器滑臂移到中间位置，则 $U_g = 15$ 伏，而在工作台改变位置之前反馈电压 $U_x = 0$ ，所以 $\Delta U = 15 \text{ 伏} - 0 = 15 \text{ 伏}$ 。该偏差电压经放大后变为电流信号去控制伺服阀，伺服阀输出油液，使液压缸推动工作台移动，直到反馈电位器滑臂达到中间位置时， $U_x = 15$ 伏， $\Delta U = 15 \text{ 伏} - 15 \text{ 伏} = 0$ ，伺服阀恢复零点而不再输出油液，液压缸活塞停止。如果指令电位器滑臂位置不断改变，则工作台位置也跟着变化。

从这个伺服系统可以看出，被控制量（工作台位置）是用传感器（反馈电位器）进行检测的。把测得的输出信号引回输入端，与指令信号进行比较，这就是反馈。用通过比较得到的偏差信号来进行控制，以便消除偏差。

为了便于研究伺服系统的工作原理，通常把系统用方块图画示。图 1-7 就是上述双电位器位置控制电液伺服系统的方块图（和图 1-5 比较）图中每个方块表示组成系统的一个元件或环节，方块之间的线条表示信号，箭头指出信号传递的方向。圆圈表示比较元件或加法点，加法点的含义如图 1-8 所示。

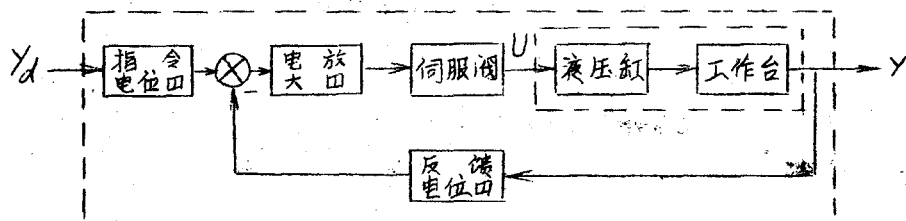


图 1-7 双电位器位置控制电液伺服系统的方块图

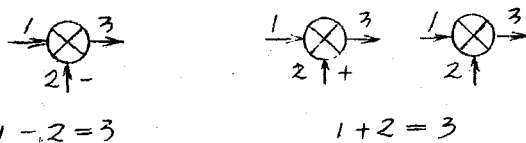


图 1-8 加法器的含义

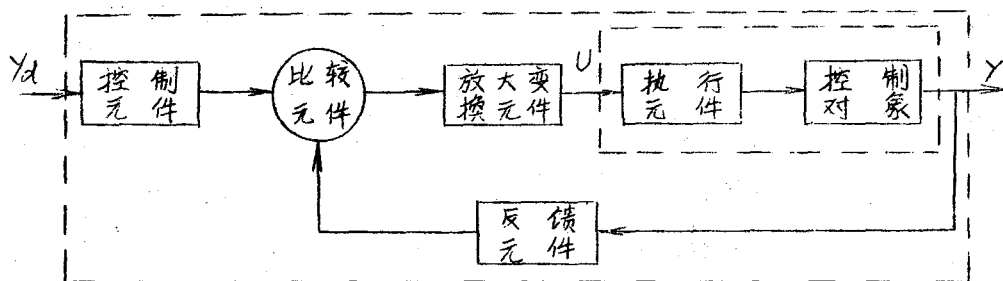


图 1-9 反馈控制系统的组成

无论多么复杂的反馈控制系统，都是由一些基本元件所组成的。图 1-9 表示组成反馈控制系统的基本元件，其中包括控制元件、反馈元件、比较元件、放大变换元件、执行元件、控制对象。

控制元件 控制元件的作用是产生控制信号。图 1-6 中的指令电位器就是控制元件。

反馈元件 它产生与被控制量有一定函数关系的反馈信号。如图 1-6 中的反馈电位器。

比较元件 它产生反映控制信号与反馈信号的差值的偏

差信号。如图 1-6 中的电位器电桥。

放大变换元件 它把偏差信号放大并进行信号的能易形式（电气、机械、液压等）的变换。如图 1-6 中的电放大器和伺服阀。

执行元件 它直接对控制对象进行控制。如图 1-6 中的液压缸。

控制对象 就是控制系统进行控制的对象，它的输出易即为系统的被控制易，例如图 1-6 中的工作台。

反馈控制系统中的各种信号归纳如下：

控制信号，或叫输入易 它是控制输出易变化规律的信号。

被控信号，或叫输出易 它的变化规律是要加以控制的。应保持它与控制信号之间有一定的函数关系。

偏差信号，或叫偏差 它是控制信号与主反馈信号之差。

误差信号，或叫误差 它是输出易的实际值与希望值之差。

干扰信号，或叫干扰 除控制信号外，对系统输出易产生影响的因素都叫干扰。

反馈信号，或叫反馈 从系统（或元件）的输出端取回信号，经过变换后再加到系统（或元件）的输入端，这就是反馈信号。当它与系统（或元件）的输入信号符号相同时叫正反馈，符号相反时叫负反馈。直接取自系统的最终输出端的反馈叫主反馈，主反馈一定是负反馈，否则偏差会越来越来，直到使系统完全失去控制。除了主反馈外，有的系统还有局部反馈，这往往是为了对系统进行补偿、线性化而加设的，有的则是元件所固有的。

第二章 数学基础和系统的数学描述

在线性、时不变、连续、集中参数和确定性系统的设计中涉及的数学工具有复变函数、拉普拉斯变换、信号流图、矩阵代数等。这里将根据工程设计所需的数学部分作结合实例的叙述，以便工程技术人员具有明确的物理概念，而不陷入繁琐的推导。本章先简单介绍线性化算法、线性微分方程，再介绍复变函数和拉普拉斯变换。信号流图将在第三章中介绍，矩阵代数将在十三章中介绍。本章末将介绍控制系统的几种数学描述方法。

2.1 线性化

控制系统的行为可以用联系系统变量的方程来描述。可以用线性方程来描述的系统叫线性系统。本文只讨论线性系统。但是纯粹的线性系统在客观世界里是不存在的。为了利用线性理论来分析和设计系统，必须对系统运动方程进行线性化。线性化有两种方法；一种方法是忽略那些比较次要的非线性因素，如小的死区、磁滞、干摩擦等。另一种是切线法，即将工作点附近的小变化量之间的关系用线性方程来近似地表达，称为该工作点的增量方程。把非线性函数在工作点展开成台劳级数，取台劳级数的一阶近似式，即可得到增量方程。台劳级数的一阶近似式为：

$$F(x) = F(x_0) + \left(\frac{dF}{dx} \right)_0 \Delta x \quad (2-1)$$

$$F(x, y) = F(x_0, y_0) + \left(\frac{\partial F}{\partial x} \right)_0 \Delta x + \left(\frac{\partial F}{\partial y} \right)_0 \Delta y \quad (2-2)$$

$$F(x, y, z) = F(x_0, y_0, z_0) + \left(\frac{\partial F}{\partial x} \right)_0 \Delta x + \left(\frac{\partial F}{\partial y} \right)_0 \Delta y + \left(\frac{\partial F}{\partial z} \right)_0 \Delta z \quad (2-3)$$