

高等学校教材

控制工程导论

李永祥

西安交通大学出版社

出 版 说 明

根据国务院关于高等学校教材工作分工的规定,我部承担了全国高等学校、中等专业学校工科电子类专业教材的编审、出版的组织工作。由于各有关院校及参与编审工作的广大教师共同努力,有关出版社的紧密配合,从1978年至1985年,已编审、出版了两轮教材,正在陆续供给高等学校和中等专业学校教学使用。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应“三个面向”的需要,贯彻“努力提高教材质量,逐步实现教材多样化,增加不同品种、不同层次、不同学术观点、不同风格、不同改革试验的教材”的精神,我部所属的七个高等学校教材编审委员会和两个中等专业学校教材编审委员会,在总结前两轮教材工作的基础上,结合教育形势的发展和教学改革的需要,制订了1986~1990年的“七五”(第三轮)教材编审出版规划。列入规划的教材、实验教材、教学参考书等近400种选题。这批教材的评选推荐和编写工作由各编委会直接组织进行。

这批教材的书稿,是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中经院校推荐,由编审委员会(小组)评选择优产生出来的。广大编审者、各编审委员会和有关出版社为保证教材的出版和提高教材的质量,作出了不懈的努力。

限于水平和经验,这批教材的编审、出版工作还会有缺点和不足之处,希望使用教材的单位,广大教师和同学积极提出批评建议,共同为不断提高工科电子类专业教材的质量而努力。

机械电子工业部电子类教材办公室

11-26/1.2

前 言

本教材系按机械电子工业部的工科电子类教材 1986~1990 年编审出版规划,由计算机与自动控制教材编审委员会自动控制编审小组征稿,推荐出版,责任编委陈新海教授。

本教材由西安交通大学李永祥主编,西北工业大学肖顺达教授主审。

本课程的参考学时数为 60 学时,前 6 章经典的线性理论只需 40 学时左右。本书主要内容为:自动控制的基本概念和策略;反馈在控制中的作用;控制系统的时域和频域分析与设计方法;采样控制系统;控制系统中的非线性问题;此外近代的状态变量法和借助计算机分析与设计控制系统的知识也在有关章节中作了简要介绍。使用本教材时应注意突出基本概念的讲解,适当组织课堂讨论,简化数学推导,同时,把输入输出描述的传递函数分析方法与状态描述的概念和方法有机地结合起来。

在本书的编写过程中,陈新海教授,肖顺达教授提出了许多宝贵的意见,西安交大胡保生教授、万百伍教授及尤昌德教授等对书稿也提出不少建议,在此编者表示诚挚的感谢。由于水平有限,书中难免存在一些缺点和错误,殷切希望广大读者批评指正。

编 者

1990 年 10 月

目 录

第 1 章 基本概念

1-1 引言	(1)
1-2 控制与系统	(2)
1-3 反馈控制系统	(3)
1-4 控制系统类型	(8)
习题	(9)

第 2 章 控制系统的数学描述

2-1 静特性的描述	(11)
2-2 动特性的描述	(12)
2-3 相似系统	(14)
2-4 传递函数	(18)
2-5 方框图变换	(19)
2-6 反馈控制系统的传递函数	(25)
2-7 状态方程	(28)
2-8 状态方程与传递函数的关系	(31)
习题	(41)

第 3 章 控制系统的时域分析

3-1 典型输入信号及时间响应	(44)
3-2 时域性能指标	(46)
3-3 求取响应曲线的方法	(47)
3-4 二阶系统响应	(54)
3-5 高阶系统响应	(59)
3-6 稳定性分析——代数判据	(60)
3-7 稳态误差分析	(64)
3-8 反馈的得与失	(70)
习题	(77)

第 4 章 控制系统的时域设计

4-1 直接设计法	(79)
4-2 根轨迹作图法	(89)
4-3 状态反馈控制	(99)
4-4 能控性与能观性	(102)
习题	(104)

第 5 章 控制系统的频域分析

5-1 概述	(107)
--------------	-------

5-2	频率特性	(108)
5-3	系统的频率特性	(118)
5-4	频域稳定判据——乃氏判据	(124)
5-5	频域灵敏度	(127)
5-6	利用频率特性评价系统	(127)
	习题	(130)
第 6 章 控制系统的频域设计		
6-1	概述	(132)
6-2	滞后校正	(133)
6-3	超前校正	(135)
6-4	滞后—超前校正	(138)
	习题	(143)
第 7 章 采样控制系统		
7-1	采样控制系统的组成	(144)
7-2	z 变换	(146)
7-3	脉冲传递函数	(150)
7-4	采样系统稳定性	(152)
7-5	采样系统的稳态误差	(154)
7-6	采样系统设计	(156)
	习题	(161)
第 8 章 控制系统中的非线性		
8-1	非线性系统	(162)
8-2	状态平面法	(164)
8-3	描述函数法	(171)
8-4	李雅普诺夫稳定性	(179)
	习题	(183)
附录 I 拉普拉斯变换 (185)		
附录 II 矩阵代数概要 (189)		
附录 III 自动控制部件 (194)		
主要参考文献 (213)		

第1章 基本概念

本章将通过许多实例来说明控制工程中的基本名词术语的定义和内涵。介绍什么是自动控制系统及其分类,并着重介绍反馈控制系统的工作原理、结构和特点,使读者对控制系统有一初步的认识。

1-1 引言

从本世纪30年代开始,自动装置大量用于操纵和控制各种加工机械和动力机械。这些自动装置不断完善,形成一类新的机械——控制机。控制机的任务是传递和处理信息,它具有某些逻辑判断能力,因而代替了人脑的部分功能。在生产中,控制机主要是控制能量或物质流,而不是为了提供能量或物质。

近年来,自动控制系统已广泛应用于电气、机械、化工、电子、建筑、冶金、宇航等各工程领域。以控制理论为生长点之一的系统控制理论也已渗透到经济、管理、生物、医学、环境保护以及社会科学等领域。在生产中,控制的参数已从单变量发展为多变量;从单机、局部自动化发展为柔性加工生产线和全盘综合自动化。运输工具、科学仪器、武器装备也在不断更新换代。在现代化的进程中,自动化的水平也不断提高,因此有人说现代化和自动化是“孪生兄弟”。

短短几十年里,控制工程发展得如此迅速,不仅仅是由于自动装置可以减轻劳动强度,把人从繁重的体力和脑力劳动中解脱出来;更重要的是实现自动控制以后,生产任务可以高质量、高速度地完成,因而大大提高劳动生产率;同时,节省了原料和能源,降低了成本;并且改善劳动条件,保证了安全生产。

本世纪40年代控制理论才开始形成专门学科。当时产生的频率法和根轨迹法是经典控制理论的基本内容。随着自动化生产技术和科学实验手段的不断进步,特别是电子计算机普遍应用后,60年代出现了以状态变量法为标志的现代控制理论。控制理论与数学关系密切,高深的数学往往成为初学者学习控制工程的障碍。本书是控制工程的入门教材,不追求用严密的数学来证明控制原理,而把数学做为分析和设计控制系统的有力工具,必需的数学知识如拉氏变换和矩阵代数等在附录中有概要介绍。

本书第1章是基本概念,引出控制工程中的术语,说明什么是自动控制系统,重点阐明反馈原理。通过实例讲解绘出控制系统方框图的方法。第2章介绍控制系统的数学描述,包括微分方程、传递函数、方框图化简、状态方程,以及它们之间的转换关系。第3~4章介绍时域分析和设计方法,提出时域性能指标,说明控制系统稳定性、快速性、精确性的定量分析和设计实例,进一步讨论反馈对系统各方面的影响,包含灵敏度、状态反馈、能控性和能观性问题。第5~6章介绍经典的频域法,重点叙述利用频率特性曲线、频域指标评价系统和选择系统结构与参数的方法。对频率稳定判据和稳定裕量进行了简要介绍。第7章介绍了包含计算机的数字控制系统。由于从 z 变换和离散模型开始讨论,读者不具备专门数学知识也能接受本章内容。限于篇幅本章未涉及离散状态模型问题。第8章阐述控制系统中的非线性,首先说明一些非线性

性特性对系统运动的影响;接着叙述分析非线性系统的状态平面法和描述函数法;最后,本书将第三次讨论到稳定性问题,介绍李雅普诺夫直接法。

由于本教材面向非自控专业的广大读者,从而在附录中简要介绍自动控制系统的主要部件是必要的,这部分内容可穿插在第2章中讲解或自学。

学习本书的全部内容约需70学时,对一学期40学时左右的课程,可只选学经典的线性部分,即使越过有关状态变量的章节,也不至影响后续内容的学习。此外各章后面均配有习题,以供读者进一步练习。

1-2 控制与系统

工程上,“控制”这个词是指有目的的操作,其目的是使被控量按照人们希望的规律变化。例如:驾驶汽车、飞机或轮船,沿着指定的路线安全到达目的地;操纵机器,加工出合格的工件和产品;让武器瞄准目标;调节发电机的激磁电流,使发电机端电压保持恒定等等。汽车、飞机、机床、武器装备、发电机组等机器设备称为控制对象。而方向、速度、机器工况、电压、电流、温度、压力、流量等等表征对象工作状态的物理量称为被控量。方向盘、操纵杆、手把、阀门等直接进行操纵的部件称作施控元件。

怎样实现控制的目标呢?以房间温度控制为例:人们通常希望房间内的温度在 $20\sim 25^{\circ}\text{C}$ 之间,在冬季用暖气片采暖。人观察室内的温度计,然后把视觉信息传送到大脑。大脑将室内的实际温度与目标温度值比较,假设目标温度是 20°C ,若实际温度是 15°C ,则偏差为 $20-15=+5^{\circ}\text{C}$ 。这时,大脑发出命令,让手把蒸汽阀门开大一点。于是进入室内的热量增加,室内温度逐渐上升。若观测到的室内实际温度是 25°C ,偏差为 $20-25=-5^{\circ}\text{C}$,大脑则命令手把阀门关小一点,使温度逐渐降低,若温度降低低于目标值则大脑又命令手将阀门开大……。这个过程不断重复,直到室内实际温度与目标值一致为止。这就是当温度偏离目标值时,利用偏差信号不同的极性和大小,适当操作阀门——施控元件,以实现维持室温恒定,达到消除偏差的目的,即利用偏差信号来消除偏差。

这个过程有人参加,称作人工控制或手动控制。图1-1是手动控制的示意图。如果从测量偏差,判断比较到执行操作完全由控制装置来实现,则称作自动控制。

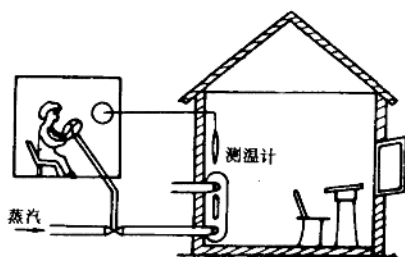


图 1-1 手动温度控制

从上面的例子可看出,若采用控制装置取代人来实现控制的目标,自动装置必须具备下述功能:

- 1) 检测被控量并转换为可以与设定目标值比较的形式(量纲和数量级相当)。

- 2) 将测量的实际值与设定的目标值比较判断,给出偏差信号。

- 3) 利用偏差信号操作施控元件(执行机构)去纠正偏差。图1-2是利用控制装置来自动控制温度的实例。图中用热敏元件测量室内温度,给出与温度成比例的电压信号。电位器的分压信号代表温度的目标值,这两个电压信号相减实现了目标值与测量值的比较。由比较产生的偏差信号经过放大器驱动电动机旋转,根据偏差信号的极性和大小,电动机可正、反方向转动,

从而使阀门开大或关小,调节进入室内的蒸汽以维持室温恒定。

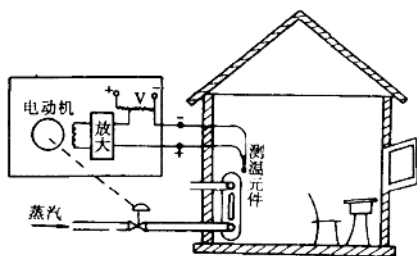


图 1-2 自动温度控制

户;而发电和供电整套装置形成电力系统;发电系统和供电系统则是电力系统的子系统。但就发电系统中的锅炉而言,它又包含给水、燃烧、供热等子系统。再细分还可以找出许多局部的、以致初级的子系统。我们把包含许多子系统的复杂系统称为大系统,图 1-3 为系统示意图。

在研究一个系统的时候,首先要分清系统的内部组成和外部环境,即划分每个系统的“边界”。根据系统的工作任务,找出完成此项任务所必须的设备,形成系统的内部组成。例如,火力发电系统包含锅炉、汽轮机、发电机等设备,而不应包括煤矿和油田;图 1-2 温度控制系统包含控制对象房间,测温元件,比较元件电位器和放大器、电动机、阀门及加热器暖气片,而汽源和电源则属于系统外部设备。

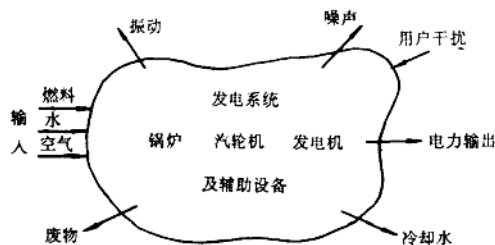


图 1-3 系统示意图

不论简单或复杂的系统,都受到内部条件的限制(如材料强度、能源功率、设备容积尺寸等)和外部的影响(环境温度、磁场、噪音、负载变动等),同时系统也给外部以影响。外部对系统的作用称为输入;而系统对外部的作用则称为输出。就控制系统而言,目标设定值是有用的输入,而外部干扰则是无用的输入。

一个控制系统只有在输入作用下才会产生输出,即输入是原因,输出是结果,实际物理系统必须遵循这种因果关系。当然,一个系统的输出可以是另一系统的输入,如发电系统的输出是供电系统的输入。

具有多个输入和输出的系统称作多输入—多输出系统;而只有一个输入和一个输出的系统称作单输入—单输出系统。本书主要讨论单输入—单输出反馈控制系统。

控制的实现是一个动态过程,我们将用“系统”的观点分析、研究这种动态过程,并使其满足稳定性、准确性、快速性等方面的要求。

1-3 反馈控制系统

1-3-1 反馈原理

自然界到处都存在着信息反馈现象。“吾日三省吾身”,人们很早以前就自觉或不自觉地利

用反馈来改进自己的行为 and 认识。瓦特蒸汽机的调速器已利用了反馈原理,当负荷增加(或减小)时,车速就相应地减慢(或加快),调速器的飞球因离心力减小而下降(或上升),从而使进汽阀门开大(或关小),车速随之回升(下降)。将负荷的变化这一信息反馈到调速器中,决定进汽量的增减,从而使车速维持恒定。本世纪 30 年代,在电子放大器中开始利用反馈改善放大器的质量,反馈的奥秘逐渐被揭示。40 年代,在工程技术领域出现了大量的自动调节装置,人们对信息反馈在控制过程中的作用加深了认识。维纳在其著名的《控制论》一书中对反馈在控制中的作用和意义给出了系统的分析和研究总结。

观测系统的输出信息并把它送回到输入端与系统的参考输入比较,并将二者之间的偏差放大后用于控制过程,从而使偏差不断减小,这就是反馈控制原理。

反馈控制系统是这样一种系统,它将输入变量与输出变量比较,利用它们之间的偏差使系统输入与输出变量保持既定的关系。图 1-2 就是一个反馈控制系统。我们把系统的输出——温度的测量值送回到输入端,并与目标值比较,目标值是系统的有用输入,反馈控制作用使输出温度与目标值保持一致。

1-3-2 方框图

为了定性和定量地评价系统的特性,便于了解每个元件(或环节)与系统特性的关系,首先要画出系统的方框图,图 1-1 和图 1-2 的温度人工和自动控制系统可分别用图 1-4 的方框图表示。画系统方框图的过程就是对系统进行分解的过程。方框图中的一个方框表示一个元件(或环节),或者表示一种功能。带箭头的线称为信号线。信号只能沿着箭头的方向传递,箭头指向方框的线表示环节的输入,从方框引出的信号线表示输出。 Σ 符号表示求和运算,输出等于

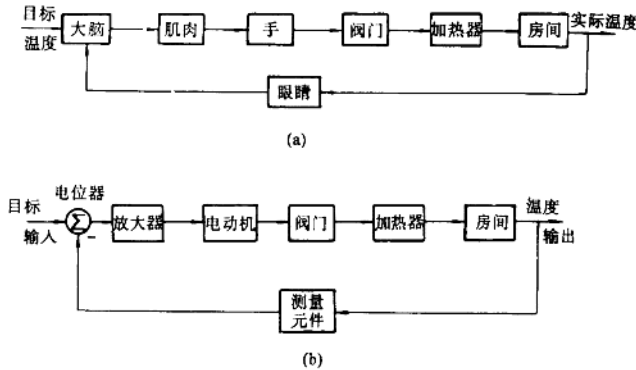


图 1-4 温度自动控制系统方框图

(a)人工控制温度; (b)自动控制温度

所有输入信号的代数 and 。一个输入为正,一个输入为负表示比较作用。进行相加或相减的信号应该具有相同的量纲和 units 。根据因果关系用信号线把各方框连接起来,即得到整个系统的方框图。

一个方框单元,从输入到输出的作用是不可逆的。当输出变量对输入变量也存在影响时,应该用另一方框表示,如图 1-5(b)。信号的引出点可以有分支,同一引出点的各分支信号等



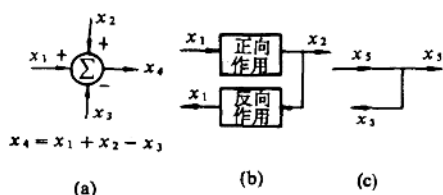


图 1-5 方框图符号

画系统方框图的步骤如下：

- 1) 首先确定作为被控对象的设备,然后找出该设备上的被控量,一般它就是系统的输出变量。
- 2) 找出检测被控参数的元件。
- 3) 求和(比较)元件输入测量信号和目标值,输出偏差信号。
- 4) 偏差信号通常需要放大,放大后操作量作用于施控元件。
- 5) 施控元件位于被控对象的输入端。把每个部件(或功能)用一个方框表示,根据上述因果关系,依次用信号线连接。这样,信号从对象输出端出发,传递一周回到对象输入端,形成一个闭环控制系统。

1-3-3 反馈控制系统实例

例 1-1 仿型自动车床

仿型车床能按照型板曲线自动加工出同样形状的工件。因此,给定输入是型板曲线,接触型板的探头上下位移 $x(t)$ 是型板曲线的时间函数表达式。图 1-6 (a) 的仿型控制系统中滑阀和大活塞固定在刀架上与刀具一起相对于工件运动,反馈杆将大活塞的位移 $y(t)$,即刀具

进给量反馈到滑阀上,其作用为 B , B 与 x 对滑阀的影响是相反的,相当于二者相减。当位移 x 与位移 y 相等时大活塞停止运动。所以,控制系统使 $x(t) = y(t)$,这样保证了加工工件的表面曲线与型板曲线一样。仿型控制系统的方框图表示于图 1-6(b)。这里被控对象是刀架,被控量是刀架的位移 y (进刀量)。反馈杆右端反映刀具的位移量,所以它是被控量的检测元件。滑阀、大活塞与反馈杆形成一个整体,即成为一台液压马达。马达输入杆连接探头,输出杆连接刀具夹。滑阀起到比较和放大的作用。

例 1-2 舰船(飞机)操舵系统

效,图 1-5(c)。

方框图只表示系统各环节之间的信息传递特性和相互作用关系,而不代表系统的物理和工程结构。许多不同的系统可能具有类似的系统方框图。同一系统的方框图也不是唯一的,因为一个部件可以用几个方框表示,反之,一个方框也可以表示几个部件的作用。

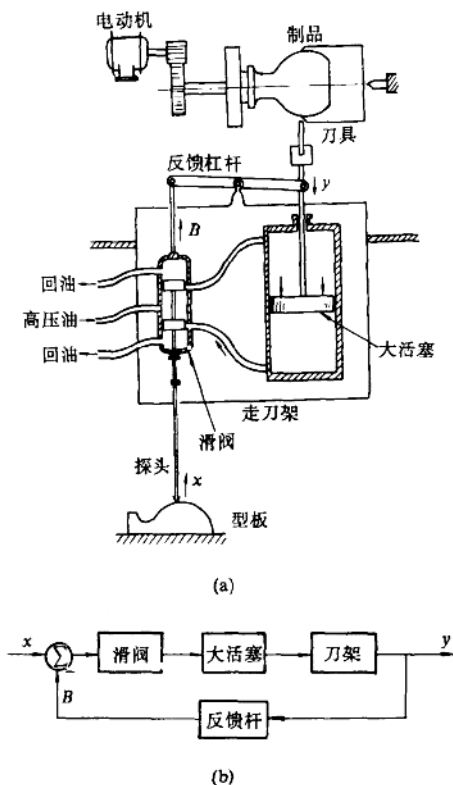


图 1-6 仿型控制系统
(a)原理图; (b)方框图

图 1-7(a) 是操舵系统的原理图。系统中被控对象是舵机,被控量是舵的角位移 θ_o 。电位器 P_i 和 P_o 将驾驶员盘和舵机的转角 θ_i 与 θ_o 转换为电压信号 e_i 和 e_o ,这两个电压信号反相串联,当 θ_o 不等于 θ_i 时,产生偏差信号 $\Delta e = e_i - e_o$ 。 Δe 经过放大器 A 放大后驱动电动机 M 旋转,电动机带动舵机 L 转动,直到 $\Delta e = 0$ 为止,这时,舵角 θ_o 与驾驶员给出的指令角 θ_i 相等。类似系统在控制火炮瞄准,跟踪卫星,轧钢,造纸等控制角位移的场合也得到了广泛应用。

图 1-7(b) 是操舵系统的方框图。

例 1-3 奶粉干燥控制

奶品生产要求把浓缩奶液干燥成奶粉。加工时奶液从高位贮奶槽流下,经过滤去掉凝块后进入干燥器。在干燥器中奶液被热空气加热使水分蒸发,最后随湿空气

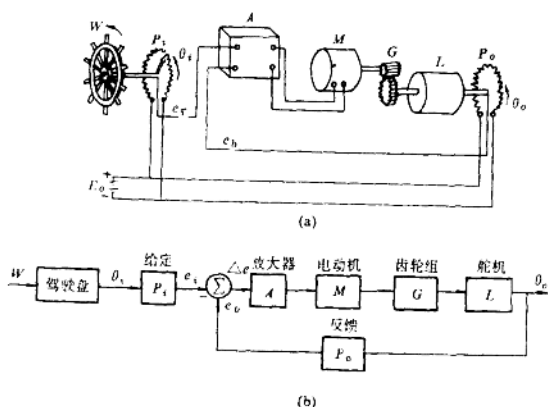


图 1-7 操舵控制系统

一起喷出,在重力作用下,空气、奶粉自然分离。整套设备包括辅机相当复杂。因为主要任务是使奶液干燥,故干燥器是对象。显然,干燥后的奶粉湿度本应是被控量,但是干燥器出口飘飘而下的粉粒湿度不容易检测。研究表明,出口的气体温度和奶粉质量关系密切,工艺要求出口温度保持恒定,因此选干燥器出口温度 T 做为被控量。奶粉干燥控制系统工作原理如图 1-8(a) 所示。

进入干燥器的空气、奶液流量和加热空气的蒸汽温度及流量都对干燥器出口温度有影响。若调节蒸汽则控制回路中将包括热交换器,它是双容对象,信号传递滞后比干燥器大得多,这对控制质量产生不利影响。若调节奶液流量将使产量波动。综合考虑以控制进入干燥器中的空气来调节出口温度的方案较好。因此,利用热敏元件测量干燥器出口温度,空气阀门选作施控元件。用与图 1-2 类似的方法产生偏差信号,经放大、驱动执行电动机去操作阀门,干燥器出口温度控制系统方框图如图 1-8(b) 所示。

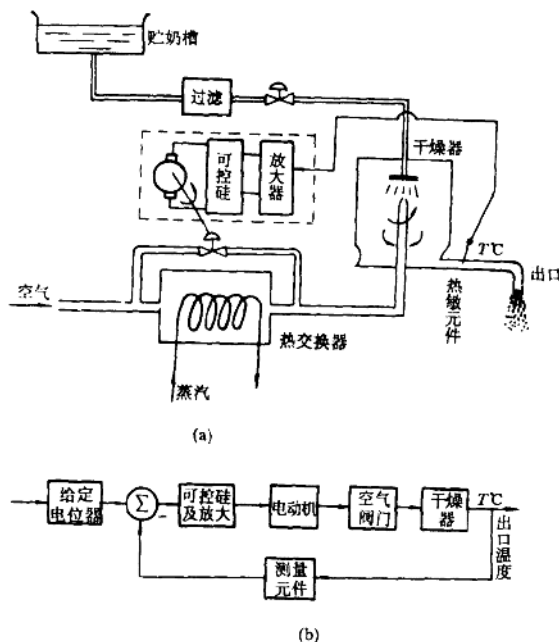


图 1-8 奶粉干燥控制系统

1-3-4 反馈控制系统的基本结构

通过以上几个反馈控制系统的实例可以看出,尽管它们的工作原理和工作任务、使用元件各不相同,但反馈控制系统总是由一些基本功能框所组成。这些基本功能框是:求和(比较)、放大、执行、测量和控制对象。此外,还包括为取得良好控制特性而引入的附加装置——校正环节。

图 1-9 是以通用符号和术语标注的典型反馈控制系统基本结构图。

控制对象——又称被控对象,它是需要控制的机器设备或生产过程。对象中,需要控制的参数称为被控量。

测量环节——对系统输出变量,即被控量进行测量,通常为各种传感器或敏感元件。

求和(比较)环节——具有两个或多个输入和一个输出,其输出是两个或多个输入信号的代数和。

放大环节——将微弱的偏差信号放大和变换,满足一定的功率和匹配要求。

执行机构——前向通路中直接改变操作量的装置,包括功率元件和施控元件。操作量是被控对象的输入作用。

校正装置——为改善控制系统特性而引入的附加装置,它常常是控制器的核心部分。

目标设定环节——又称给定装置,它把指令信号变换成参考输入信号以便与反馈信号比较。它产生系统的有用输入信号,但不是反馈控制系统内部组成部分。

实际的控制系统可能是一个部件实现几种功能,或者几个部件实现一种基本功能。有时把测量、求和、给定作用组成一个部件,称作误差检测器。目前工业上批量生产的一种调节器,把给定、放大、求和、校正环节都包含在一台仪表中。

1-3-5 反馈控制系统的特点

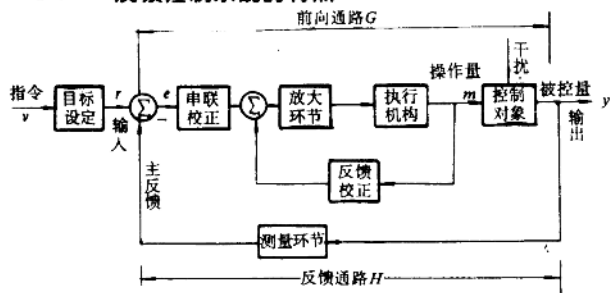


图 1-9 反馈控制系统的基本组成

反馈控制是最基本的控制策略之一,它不仅在工程系统中发挥重要作用,在许多非工程领域,如生物、经济、管理、人口、生态等方面也扮演着重要的角色。掌握反馈控制系统的特点,有助于区分反馈和非反

馈,也有助于进一步分析反馈对系统各方面的影响。

反馈控制系统的主要特点:

- 1) 反馈控制系统的操作量与被控量的测量值有关,而操作量又与偏差信号有关,所以偏差控制原则与反馈控制原理本质相同。
- 2) 反馈系统中,信息总是沿着一个方向传递,经由反馈通路和前向通路形成闭合回路,所以反馈控制又称作闭环控制。
- 3) 主反馈信号与参考输入信号符号相反(相减)则称为负反馈;两信号符号相同(相加)则称为正反馈。负反馈使偏差越来越小,而正反馈将使偏差越来越大,所以,主反馈不允许采用

正反馈。

4) 反馈控制过程一般是动态过程,即偏差不可能瞬间消除,它是随时间逐渐减小的。实际上,系统输入、输出和内部参数都是时间的函数。有关这方面的问题,如反馈系统动力学特性等,将在后面章节深入研究。

1-4 控制系统类型

1-4-1 闭环和开环控制系统

闭环与开环系统是根据有无反馈来区分的,闭环系统就是反馈系统。闭环系统利用被控量的测量值来改变操作量,进而减小偏差。因此,不论是什么原因(干扰)造成的偏差,都可以通过反馈控制加以抵消。相对来说,闭环系统复杂些,费用较大,还存在动态稳定性问题。

开环控制系统不利用被控量的测量值改变操作量,即不存在反馈通路,开环控制的操作量是人们根据经验和知识设定的。例如:电动洗衣机是由定时器操纵的,人们根据说明书和经验设定定时器的时间值,洗衣机运转到设定的时间就停止,而衣服是否洗净与洗衣机的运转无

关,见图 1-10。

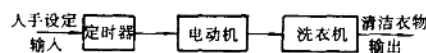


图 1-10 开环控制系统

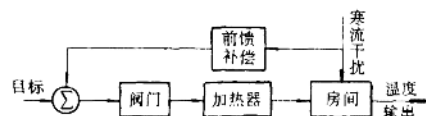


图 1-11 前馈温度控制系统

一些自动机床、数控机械也是开环控制的。其加工精度靠人调整机床、设置顺序进刀量,以及传动机构的精度来保证。一旦受到干扰或传动机构磨损,加工精度就不能保证了。这是它的主要缺点。开环系统结构简单,一般比较经济,且往往可以排除闭环系统中存在的稳定性问题。

开环-前馈补偿控制是一类重要的开环控制方式。前馈控制直接测量影响被控量的扰动量,根据所测扰动量来适当改变操作量,以抵消该扰动对被控量的影响。如图 1-11 所示室温补偿控制系统,当冬季寒流到来,室外环境气温下降,引起室内温度降低。人们根据准确的天气预报把房间内的暖气阀门适当开大,以维持室温一定。若夏季出现热浪,则把冷气阀相应地开大。

前馈控制测量干扰本身,而不是测量扰动的结果——被控量的变化,所以补偿迅速、及时,在主要扰动频繁,剧烈变化的场合前馈控制效果显著。但前馈控制只能抵消被测量的主要干扰,对其它无法预计的、次要的干扰造成的输出偏差不能抵消,这是前馈控制的缺点。许多情况下,采用前馈-反馈组合方式可取得很好的控制效果。

1-4-2 恒值控制系统与随动系统

根据参考输入信号的性质,反馈控制系统大致可分为恒值控制系统和随动系统。恒值控制系统的参考输入信号通常为定值。如图 1-2,图 1-8 的室温控制系统和奶粉干燥控制系统都是恒值控制系统。它们的工作任务是使被控制量——温度保持恒定。若生产工艺条件变化,改变系统的指令信号,可使系统保持在另一给定值上。

随动系统的参考输入信号一般是无法预计的,是任意的时间函数。如图 1-6 和 1-7 中,仿型车床的输入信号随工件形状而变化,操舵控制系统的输入随航向变化,所以它们都是随动系统。这种用来控制机械位移的随动系统也称作伺服系统。

1-4-3 连续控制系统与采样控制系统

连续控制系统和采样控制系统是按传输信号来区分的。连续控制系统中传输的信号全部是时间的连续函数,在可能的极大值和极小值之间可以取任意值,前面的例子都是连续控制系统。

采样控制系统中传输的信号包含一个以上的采样信号。采样信号是时间上不连续的一串脉冲或数字信号。脉冲信号可能取任意的电平值,而数字信号只有高低两个电平值,控制装置中含有微处理器和计算机的系统即成为采样控制系统。采样控制系统的分析和设计方法有别于连续系统,本书第 7 章将对采样控制系统进行较详细的讨论。

1-4-4 线性和非线性控制系统

为了分析和研究的便利,可将控制系统分为线性系统和非线性系统两类。它们可以是定常的或时变的。

线性系统是由一组线性方程式描述的系统。如果一个系统由两个输入(激励)引起的输出之和等于两个输入之和引起的输出,则该系统称作线性系统,否则就是非线性系统。换句话说,线性系统是满足叠加原理的系统。

如果系统的方程中的参数不随时间改变,则该系统就称作定常系统,反之则称为时变系统。

非线性系统不能应用叠加原理加以研究。许多实际的物理系统或多或少都存在一些非线性因素,但在一定范围内,经过线性化处理,总可以用一个线性模型来研究它的特性。然而本质非线性控制系统的行为与线性控制系统的行为不同,会产生一些线性系统中没有的现象,如极限环、滑动等,这类系统不能应用线性理论来研究,为此本书将在第 8 章就非线性控制问题做专门的讨论。

习 题

1-1 人们用手取桌上的物体,这个过程是开环控制还是闭环控制?如果构成一个控制系统,系统的输入和输出是什么?

1-2 家用电冰箱由箱体、温度控制盒、压缩机、冷凝器、蒸发器、电动机等部件组成。是否可利用这些部件构成一个控制系统?画出系统方框图,指出各部分的功能以及系统的输入和输出。

1-3 图 1-12 是液位控制的原理图。试用方框图说明系统的组成,并指出各基本功能部件。

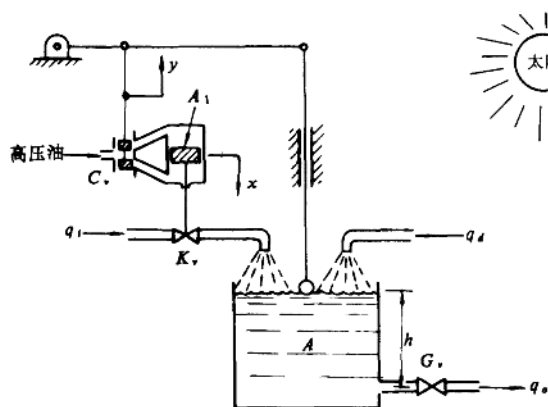


图 1-12 液位控制

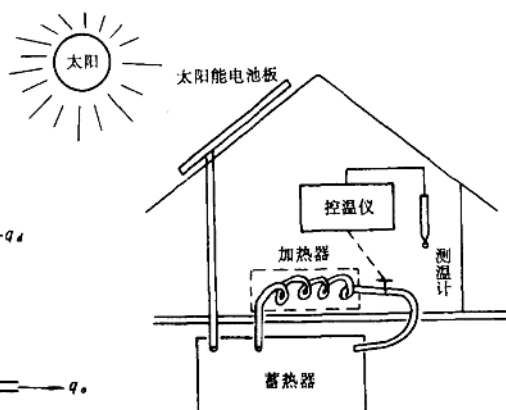


图 1-13 太阳能采暖系统

1-4 图 1-13 是利用太阳能采暖的原理图。试画出相应的温度控制系统方框图, 指出系统的有用输入和无用输入作用。

1-5 找一找自己身上有哪些控制系统。

1-6 图 1-14 是遥控机械手的示意图。这是个开环控制系统吗? 画出系统方框图。

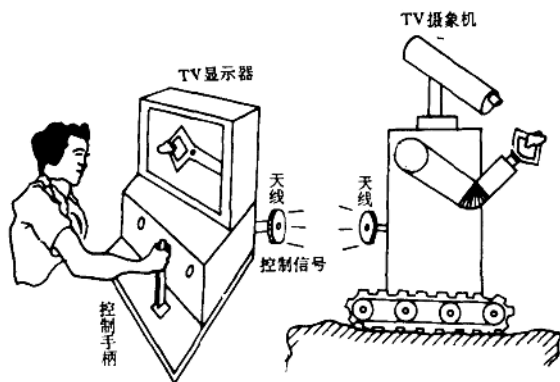


图 1-14 遥控机器人

第 2 章 控制系统的数学描述

为了对系统进行定量分析和设计,本章将讨论系统或元件的输入和输出之间的数学关系。首先找出各元件的输入与输出之间的数学描述,填入该元件的方框中;然后借助方框图的变换和化简,可以方便地求得系统的输入和输出之间的数学关系。

一般根据物理定律和约束条件找出系统或元件输入与输出之间的关系,用数学方程描述出来,这些方程称作系统(元件)的数学模型。它们可以是代数方程、微分方程或差分方程。

代数方程表示系统变量之间与时间无关的关系。它是在系统达到稳态时变量之间的关系,通常称作稳态方程。

微分方程包含系统变量对时间的变化率,所以物理系统的动态特性用微分方程表示,一般称作动力学方程。这里动力学一词是广义的,泛指各种机械、光学、电气、电子、热力学等方面的运动规律。

系统变量如果是不连续的,它们之间的关系就需用差分方程表示。

建立数学模型主要有两种方法:分析法和实验法。分析法是根据一些基本的物理学原理来推导元件或系统的数学方程,例如:牛顿第二定律(机械系统),克希霍夫定律(电学系统),热力学定律(热工系统),伯努利定律(流体系统)等。在许多生产过程中,物理变化与化学变化交织在一起,很难用分析法导出精确的数学模型,这种情况下可以利用实验——辨识方法求取系统或对象和生产过程的数学模型。本章将着重介绍建立数学模型的指导思想和方法,指出各种数学模型的特点和性质,而不是用许多篇幅去推导具体的数学模型。一些常用元件或系统的数学模型在有关的工程手册中可以查找到。

2-1 静特性的描述

静特性是指平衡状态,即稳态时输入和输出之间的关系。由于与时间变量无关,所以用代数方程表示静特性。例如齿轮传动及有中间支点的杠杆运动,在允许的范围内输出与输入之比是一个常数,通常采用输出增量与输入增量之比 K 来表征稳态时输出与输入之间的关系。

$$K = \frac{\text{输出的改变量}}{\text{输入的改变量}} = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (2-1)$$

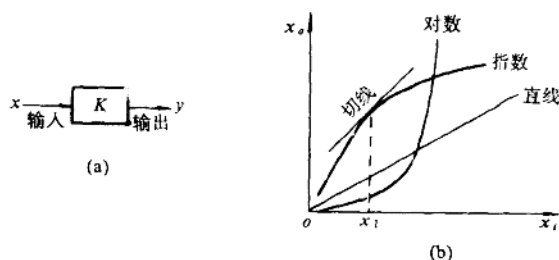


图 2-1 静特性曲线

常数 K 叫做传递系数,当输出与输入量的量纲相同时,比值 K 称作放大系数。一些传感器把非电物理量转换为电信号以便于连接电气系统或电子计算机,这些传感器的灵敏度就是它们的传递系数。

某些元件,例如磁性元件、晶体管等,在输入或输出幅度不同时,即工作区域不同时,输出与输入的比值也不相同。输出和输入之间可能存在平方、对数、指数等非线性关系。这种情况下,传递系数可以用工作点附近切线的斜率表示,如图 2-1(b)所示。

$$K_0 = \left. \frac{dy}{dx} \right|_{x=x_0} \quad (2-2)$$

这种用切线逼近曲线的方法称作线性化。线性化处理后得到的数学方程可以认为是线性方程。当控制系统在工作点附近,即小偏差范围内工作时,只要在此范围内没有间断点或非单值特性存在,都可以进行线性化处理。

寻找元件相互作用的主要关系,忽略次要因素,写出简化的数学方程,进行线性化处理,这是建立系统数学模型的第一步。

2-2 动特性的描述

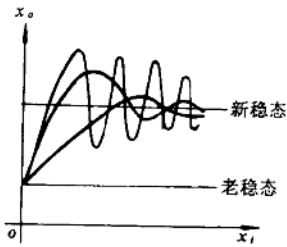


图 2-2 控制系统动特性

输入与输出之间的平衡状态总是相对的,控制过程一般是动态过程。输入作用除人为设定量的改变外,还包括影响系统输出的各种外作用。所以,在输入作用下,输出总是从一个旧的平衡状态过渡到一个新的平衡状态,这种过渡特性就是动特性,一般它们是时间的函数。描述输出与输入动态关系的数学方程包含变量的导数,叫做微分方程。

我们设计控制器的主要目的是抵消有害外作用的影响,使系统输出按人们要求的规律运动。因此,研究不同输入作用下输出的变化情况,推导并应用动特性模型研究控制系统具有重要的理论和实际意义。

利用系统的数学模型可以在电子计算机上模拟系统的动态特性,借助数学模型和计算机检验设计思想,选择控制器的参数和结构。这样做比实际系统实验不仅方便些,而且更经济,还可以避免由于事先设计不周全而在实际系统试验中可能造成的人身或设备事故。

前已指出,推导数学模型依靠物理学原理,例如,机械系统的运动常常遵循牛顿动力学定律。在力学中直线位移运动主要由三个变量:加速度 a ,速度 v ,位移 x 决定。在给定方向上,作用于一个刚体的力的代数和等于物体质量与同方向的加速度的乘积。这个定律可表示为

$$\Sigma F = ma$$

式中 m 为物体的质量。

现在,用牛顿第二定律推导图 2-3 所示系统的微分方程。弹簧-质量-阻尼系统的位移运动可看做一个小汽车减振系统的简化图。

$$\Sigma F = f_s - f_k - f_b = ma \quad (2-3)$$

式中 f_s 为输入外力;