

1007228

# 控制理论基础

上海市教育委员会 组编  
王显正 陈正航 王旭永 编著

科学出版社



上海市普通高校「九五」重点教材



## 内 容 简 介

本书主要介绍反馈控制系统的基本理论及其工程分析和设计方法。全书共十章。前三章主要介绍反馈控制系统的基本工作原理,物理系统的数学模型,包括频率特性在内的一些基本概念。第四至第七章介绍控制系统的稳定性分析、稳态误差分析、瞬态响应分析以及控制系统的设计和校正。第八章对工程中常用的根轨迹法作了介绍。最后两章讲述了采样控制系统和 nonlinear 控制系统。书中列有大量的例题和习题,书末附有 MATLAB 控制软件的应用简介和实例。

本书可作为高等学校机械工程与自动化、机械电子工程等机械类专业的教材,也可以供有关专业的工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

控制理论基础/王显正,陈正航,王旭永编著. —北京:科学出版社,2000  
(上海市普通高校“九五”重点教材)

ISBN 7-03-008657-0

I. 控… II. ①王… ②陈… ③王… III. 控制论-高等学校-教材  
IV. O231

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 65338 号

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号  
邮政编码:100717

源海印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2000 年 11 月第 一 版 开本:787×1092 1/16  
2000 年 11 月第一次印刷 印张:25  
印数:1—4 000 字数:576 000

定价:36.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(杨中))

## 前 言

《控制理论基础》是在前两版的基础上,根据机械电子工程、机械工程与自动化专业的教学大纲编写的.本书自1980年出版以来,已被国内许多所高等院校选作教材.经过多年的教学实践,这次在多方听取意见的基础上重新做了编写、修订.新版保留了前版教材编写的体系和特点.根据大纲要求,本书系统地介绍了经典控制理论的主要内容,着重讲述了控制系统的反馈工作原理、物理系统的数学模型以及系统的分析和设计,同时对采样控制系统和非线性系统也作了介绍.为了便于学生加深对概念的理解和在实际中的具体应用,每章都列举了大量的例题和习题,并在附录中给出 MATLAB 控制软件应用简介.此外,还编写了与教材相配套的《控制理论基础习题与解答》.

本书前三章由王显正编写,第四、五、六、十章由陈正航编写,七、八、九章及附录由王旭永编写.王显正对全书进行了校核和修改.由于编者水平有限,我们热忱欢迎选用本教材的老师、学生以及科技工作者对本书的缺点和错误批评指正.

编 者  
2000年1月

# 目 录

<b>第一章 绪论</b> .....	( 1 )
第一节 自动控制及其发展概述 .....	( 1 )
第二节 控制系统的反馈工作原理及其组成 .....	( 2 )
第三节 自动控制系统的分类 .....	( 9 )
第四节 对控制系统的要求及常用典型控制信号 .....	( 12 )
小结 .....	( 16 )
习题 .....	( 17 )
<b>第二章 物理系统的数学模型</b> .....	( 21 )
第一节 控制工程的数学方法 .....	( 21 )
第二节 物理系统的数学模型 .....	( 33 )
第三节 非线性数学模型的线性化 .....	( 43 )
第四节 典型环节及其传递函数 .....	( 47 )
第五节 系统方块图及其传递函数 .....	( 59 )
第六节 信号流图 .....	( 72 )
小结 .....	( 76 )
习题 .....	( 77 )
<b>第三章 频率特性</b> .....	( 83 )
第一节 频率特性的基本概念 .....	( 83 )
第二节 幅相频率特性 .....	( 88 )
第三节 对数频率特性 .....	( 93 )
第四节 闭环系统的频率特性 .....	( 105 )
第五节 数学模型的实验确定法 .....	( 112 )
小结 .....	( 116 )
习题 .....	( 117 )
<b>第四章 控制系统的稳定性分析</b> .....	( 120 )
第一节 稳定性的基本概念 .....	( 120 )
第二节 劳思-赫尔维茨稳定判据 .....	( 123 )
第三节 尼奎斯特稳定性判据 .....	( 129 )
第四节 稳定性裕量 .....	( 144 )
小结 .....	( 148 )
习题 .....	( 148 )
<b>第五章 控制系统的误差分析</b> .....	( 151 )
第一节 误差的基本概念 .....	( 151 )
第二节 稳态误差系数与稳态误差 .....	( 154 )

第三节	动态误差系数与稳态误差	(161)
第四节	扰动作用下的系统稳态误差	(166)
小结		(170)
习题		(170)
<b>第六章</b>	<b>控制系统的瞬态响应分析</b>	(174)
第一节	一阶系统的瞬态响应	(174)
第二节	二阶系统的瞬态响应	(177)
第三节	瞬态响应指标及其与系统参数的关系	(184)
第四节	具有零点的二阶系统的瞬态响应	(190)
第五节	高阶系统的瞬态响应	(192)
第六节	控制系统瞬态响应指标和频率响应指标的关系	(199)
小结		(202)
习题		(203)
<b>第七章</b>	<b>控制系统的综合和校正</b>	(207)
第一节	系统设计概述	(207)
第二节	常用的校正方法	(213)
第三节	控制系统串联校正装置的设计	(219)
第四节	控制系统反馈校正装置的设计	(231)
第五节	复合控制系统	(239)
小结		(244)
习题		(244)
<b>第八章</b>	<b>根轨迹法</b>	(247)
第一节	根轨迹法基本概念	(247)
第二节	绘制根轨迹图的基本规则	(251)
第三节	控制系统的根轨迹分析	(263)
第四节	用根轨迹法设计与校正控制系统	(269)
小结		(278)
习题		(278)
<b>第九章</b>	<b>采样离散控制系统</b>	(281)
第一节	概述	(281)
第二节	信号的采样	(282)
第三节	采样信号的复现与零阶保持器	(284)
第四节	$z$ 变换和 $z$ 反变换	(287)
第五节	脉冲传递函数	(297)
第六节	采样系统的稳定性	(305)
第七节	采样系统的稳态误差	(310)
第八节	采样系统的动态性能分析	(314)
第九节	采样控制系统的设计校正	(319)
小结		(324)

习题	(325)
<b>第十章 非线性控制系统</b>	<b>(328)</b>
第一节 概述	(328)
第二节 描述函数法	(332)
第三节 非线性系统的描述函数法分析	(344)
第四节 非线性系统相平面分析法	(358)
小结	(368)
习题	(369)
<b>参考文献</b>	<b>(373)</b>
<b>附录</b>	<b>(374)</b>
附录 I 拉普拉斯变换表	(374)
附录 II 校正网络	(377)
附录 III 基于 MATLAB 的控制系统分析简介	(383)

# 第一章 绪 论

## 第一节 自动控制及其发展概述

自动控制在工业、农业、国防及科学技术的现代化中起着重要作用,在国民经济和国防建设的各个领域得到了广泛的应用.自动控制技术的应用,不仅使生产过程实现了自动化,极大的提高了劳动生产率,而且减轻了人们的劳动强度,这在冶金、采矿、机械、化工、电子等部门尤为明显.同时,自动控制又可使工作具有高度的准确性,大大地提高了产品的质量和数量,提高了武器的命中率和战斗力.

所谓自动控制,就是指在没有人直接参与的情况下,利用控制器使生产过程或被控对象的某一物理量准确地按照预期的规律运行.例如,火炮根据雷达指挥仪传来的信息能够自动地改变方位角和俯仰角,随时跟踪目标,瞄准弹着点.程序控制机床能够按预先排定的工艺程序自动地进刀切削,加工出预期的几何形状.电弧炼钢炉的电极能自动地跟随钢水的液面作上下移动,以便与液面保持一定距离.所有这些控制系统的例子,尽管它们的结构和功能各不相同,但我们可以发现它们有共同的规律,即它们都是一个或一些被控的物理量按照另一个物理量的变化而变化,或者保持恒定.而控制系统都是由被控对象和控制装置构成的.这里所说的系统,就是完成一特定任务的一些部件的组合.因此,广义而言,系统的概念并不仅限于物理系统,也包含了生物学、经济学等现象的系统.

随着自动控制理论和实践的不断发展和人们提供了获得自动控制系统最佳性能的各种方法,这又促使自动化程度的进一步提高.同时,由于大量工程控制及设计问题都要涉及到系统动态过程的综合,因此控制理论又是系统动力学的理论基础.对于机械振动、机构学、摩擦学、机械产品的加工、动态参数或过程的测试等都用控制论的观点、方法来研究,以揭示出它们更深刻的本质,从而找出改进和控制它们性能的更有效的途径.不仅如此,控制理论的应用目前已远远超出了工程范围,而普遍用于生物学、社会学和经济学等非工程领域中,比如建立起各种复杂、完整的反馈模型等.事实上,介于多学科之间的控制理论,它已渗透到各个工程领域,已成为工程技术人员必不可少的一门基础知识.

控制理论作为一门独立的工程学科,还是1940年以后的10年期间形成的.一般公认瓦特1770年发明的控制蒸汽发动机速度的飞球调节器是最早的控制系统的例子.通常这个调节器容易振荡.大约100年后,麦克斯韦(J. C. Maxwell)才分析了飞球调速器的动态性能,发表了“论调节器”一文.可以说这是有关反馈控制理论的第一篇正式发表的论文.紧接着赫尔维茨(A. Hurwitz)于1875年、劳思(E. Routh)于1884年、李雅普诺夫(A. A. Ляпунов)于1892年都对调节理论做出了重要贡献,并提出了几个重要的稳定性判据.这一时期,控制系统也开始广泛用于工业控制,乃至武器控制,比如第一次世界大战期间用于火炮仰角的随动控制系统和舰船的自动驾驶.

在第二次世界大战前夕,自动控制理论有了进一步的发展.1934年,赫兹(H. L. Hazen)发表了具有历史意义的著作《伺服机构理论》,第一次提出了控制系统的精确理论.

这一期间自动控制理论开始由机械工程领域进入到通讯工程领域,而通讯工程师习惯于用“频率响应”来描述系统及分析问题.1932年尼奎斯特(H. Nyquist)在研究负反馈放大器时,提出了有名的稳定性准则和稳定裕量的概念.在此基础上,波德(H. W. Bode)于1945年发表用图解法来分析和综合反馈控制系统的方法,并将其应用于控制工程中,这就形成了控制理论中用于分析和设计控制系统的频率法.

第二次世界大战大大推动了自动控制理论和实践的发展.飞机、火炮、舰船的快速精确的控制,雷达跟踪和导弹制导技术发展之快令人惊奇.战后,随着大战期间很多理论及实践成果的公布,控制理论出现了蓬勃发展的新阶段.1948年,伊万斯(W. R. Evans)提出了根据系统参数变化时特征方程根变化的轨迹来研究控制系统的“根轨迹”理论.创建了用微分方程模型来分析系统性能的整套方法.至此,控制理论发展的第一阶段——自动调节阶段基本完成.建立在频率法和根轨迹法基础上的理论,通常称为经典控制理论.

60年代初,人造地球卫星空间技术的发展,要求实时地、高精度地处理多变量和非线性控制问题.由于数字计算机技术日趋成熟和完善,这样就有可能在研究中利用标准式或状态形式的常微分方程作为数学模型,直接在时域内进行大量复杂的解算、设计以及实现高度完备的最优控制.并逐步形成了一套完整的理论,这就是有别于“经典”的“现代控制理论”.最优控制理论是由庞特里亚金(Л. С. Понтрягин)、贝尔曼(R. Bellman)、卡尔曼(R. E. Kalman)等提出来的.从60年代至今,现代控制理论又有巨大发展,并形成若干分支,如线性系统理论、最优控制理论、动态系统辨识、自适应控制、大系统理论等等.

作为控制工程这一学科的发展.从40年代至今大体可分为两个阶段:自动调节阶段(40~60年代初)和最优控制阶段(60年代以后),各阶段的特点见表1.1.

表 1.1 自动调节与最优控制阶段特点

特 点 \ 阶 段	自动调节阶段	最优控制阶段
研究对象	单输入-单输出线性自调系统	多输入-多输出复杂系统
分析、设计方法	频域法	时域法
数学模型	传递函数	状态方程
理论基础	以反馈为中心的经典控制理论	现代控制理论
研究的主要内容	稳定性问题	最优化问题
采用的主要控制装置	机、电、液、气元件、调节器	计算机
自动化的主要标志	局部、单机自动化	实现复杂系统的现场数控

无论从深度上还是从广度上,控制工程都在不断地发展.当今已从控制和信息的观点跨越学科把机器和生物联系起来,发展到以控制论、信息论、仿生学为基础的,以智能机为核心的智能控制系统阶段.

## 第二节 控制系统的反馈工作原理及其组成

### 一、控制系统的反馈工作原理

在各种生产过程以及生产设备中,常常需要使某些物理量,如温度、压力、位置、转速



等保持恒定,或者让它按照一定的规律变化.要满足这一条件,就应对生产机械或设备进行及时的控制和调整,以抵消外界的干扰和影响.那么,控制系统是怎样实现对这些物理量自动控制的呢?为了回答这个问题,我们还是先看看恒温控制系统这个例子,研究一下它是怎样实现恒温控制的.在这个基础上再总结出控制系统的共同规律.

实现恒温控制有两种方法:人工控制和自动控制.然而,很多自动控制都是受到人工控制的启发而实现的.

### 1. 人工控制

图 1.1 为一人工控制的恒温控制箱.人工控制的任务是克服外来干扰,如电压波动、环境温度变化等以保持温箱的温度恒定.这可以通过移动调压器活动触头位置来改变加热电阻丝的电流,以达到温控的目的.箱内温度是由温度计进行测量的.人工调节过程可以归纳如下:

(1) 观察由测量元件(温度计)测出的恒温箱的温度(被控制量).

(2) 与要求的温度值(给定值)进行比较,得出偏差的大小和方向.

(3) 根据偏差的大小和方向再进行控制.当温箱温度高于所要求的给定值,就移动调压器触头将电流减少,使炉温降到正常范围内;若低于给定的温度,则移动调压器触头将电流增加,使温度升到正常范围.

因此,人工控制的过程就是测量、求偏差、再控制以纠正偏差的过程.简单地讲,就是“检测偏差用以纠正偏差”的过程.

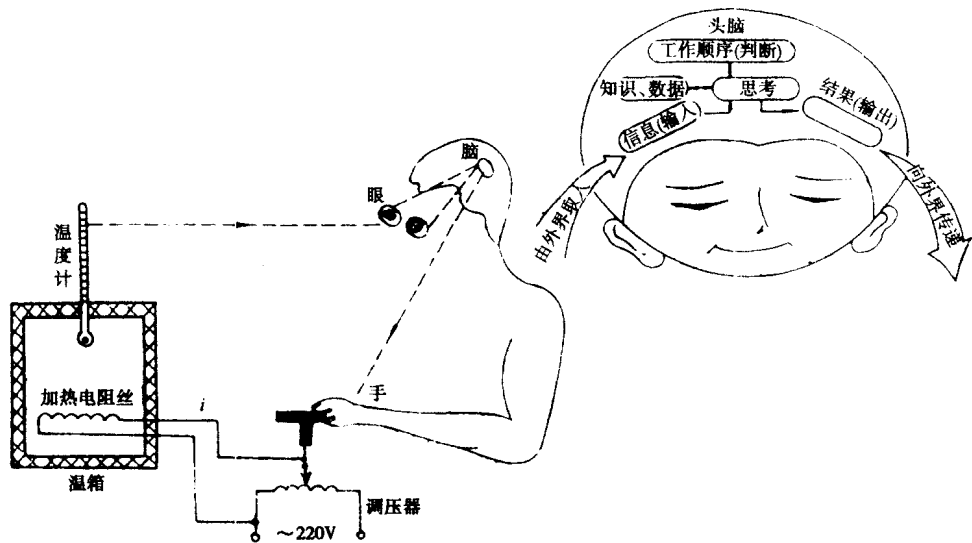


图 1.1 人工控制的恒温箱

显然,完成这一过程需要一个检测温度用的测量元件(温度计)和一个纠正偏差用的控制工具(调压器).而被控制量(温箱温度)与给定温度的比较,以及决定怎样去控制调压器,这些都是分别通过人的眼、脑、手来实现的.对于这样简单的控制形式,如果能找到一个控制器代替人的职能,那么这样一个人工调节系统就可以变成自动控制系统了.

## 2. 自动控制

图 1.2 就是根据上述替代方法构成的自动恒温控制系统. 在这个系统中, 恒温箱的温度是由给定信号电压  $u_1$  控制的. 当外界因素引起箱内温度变化后, 作为测量元件的热电偶将与温箱温度相对应的电压信号  $u_2$  测量出, 并反馈回去与给定信号  $u_1$  进行比较. 所得结果  $\Delta u = u_1 - u_2$ , 即为温度的偏差信号. 经过电压、功率放大器放大后去控制执行电机的旋转速度和方向, 并通过传动装置拖动调压器动触头. 当箱内温度偏高时, 使调压器减小加热电流, 反之加大电流, 直到温度达到给定值为止. 此时, 偏差信号  $\Delta u = 0$ , 电机停止, 这样, 就完成了所要求的控制任务. 而所有这些元件便组成了一个自动控制系统.

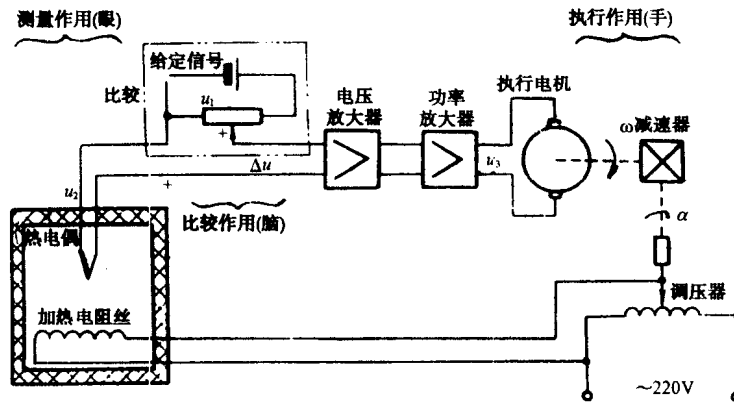


图 1.2 恒温箱的自动控制系统

上述自动控制系统和人工控制系统是极相似的. 测量元件类似于操纵者的眼睛(测量作用); 控制器类似于操纵者的头脑(比较作用); 执行元件类似于操纵者的肌体和手(执行作用).

## 3. 反馈控制原理

通过上面的分析可以看出, 不论是人工控制还是自动控制, 它们都有两个共同点: 一是要检测偏差; 二是要用检测到的偏差去纠正偏差. 可见, 没有偏差便没有调节过程. 通常在自动控制系统中, 这一偏差是通过反馈建立起来的. 给定量称为控制系统的输入量, 被控制量称为系统的输出量. 反馈就是指输出量通过适当的测量装置将信号的全部或部分返回到输入端, 使之与输入量进行比较的意思. 比较的结果叫做偏差. 控制系统就是根据这一偏差的大小和方向进行工作, 以使偏差减小或消除, 从而使输出量复现输入量. 因此, 基于反馈基础上的“检测偏差用以纠正偏差”这一原理又称为反馈控制原理. 根据反馈原理组成的系统称为反馈控制系统.

现将图 1.2 画成图 1.3 方块图形式. 图中方块代表系统的各个组成部分;  $\otimes$  代表比较元件; 方块两边直线及其标注代表该组成部分在控制过程中相互作用的物理量; 箭头代表作用的方向. 这种方块图又称结构方块图, 对于了解系统的作用原理是显而易见的. 同时还可以看出, 被调节量(温度)是系统的输出量, 给定的电压信号是系统的输入量. 偏差是通过热电偶将输出量反馈到输入端与输入量比较而得.

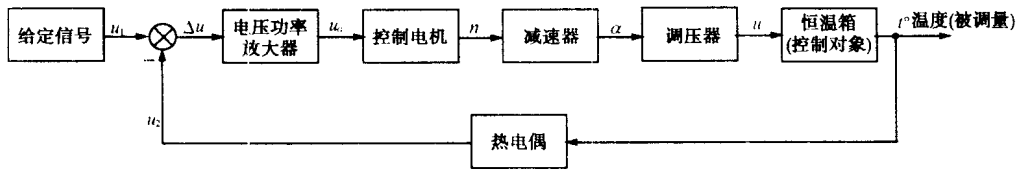
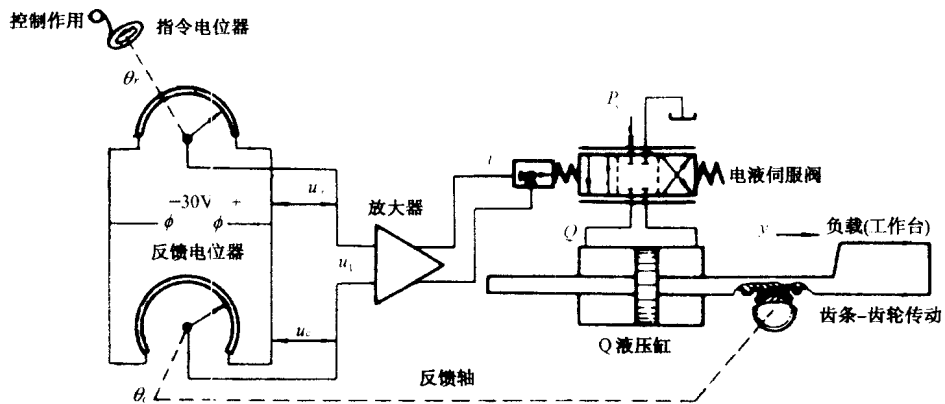


图 1.3 恒温箱温度控制系统方块图

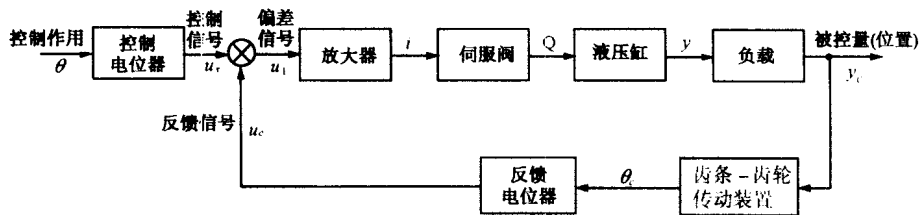
#### 4. 举例

为了更清楚地说明按反馈原理构成控制系统的普遍性,下面再举一个例子.

图 1.4(a)和(b)分别为—控制工作台位置的电液反馈控制系统的工作原理图和方块图.该控制系统的目的是控制工作台的位置,使之按指令电位器给定的规律变化.操作者



(a) 位置控制系统原理图



(b) 系统的方块图

图 1.4 工作台位置控制系统

移动指令电位器的滑臂,滑臂的角度位置  $\theta_r$  被转换成的控制电压  $u_r$ . 被控制的工作台位置由反馈电位器检测,转换成电压  $u_c$ . 当工作台的位置与指令信号的位置有偏差时,通过由两个电位器接成的桥式电路而得到该偏差电压  $u_1 = u_r - u_c$ ,当开始指令电位器和反馈电位器的滑臂都处于右端位置时,  $u_r = 0, u_c = 0$ ,故  $u_1 = u_r - u_c = 0$ ,即没有偏差信号,工作台处于静止状态.若突然给一指令信号,将指令电位器的滑臂移到中间位置,假设此时  $u_r = 15V$ ,而在负载(工作台)改变位置之前瞬间,反馈电压  $u_c = 0$ ,所以工作台与指令信

号位置间的偏差电压  $u_1 = 15V - 0V = 15V$ . 该偏差电压经放大后变为电流信号去控制伺服阀, 伺服阀便输出压力液压油, 使液压缸推动工作台移动, 以减小偏差, 直到反馈电位器滑臂达到中间位置,  $u_1 = 15V$ , 即输出完全复现输入. 此时偏差电压为零 ( $u_1 = 15V - 15V = 0$ ). 伺服阀恢复零位而不再输出压力油, 液压缸活塞便停止运动, 于是工作台达到了指令信号所规定的位置. 如果指令电位器滑臂位置不断改变, 则工作台位置也跟随着不断变化. 从这个例子可以看出: 为了使被控制量与控制作用之间保持所需要的函数关系, 系统不断地对被控制量进行检测, 并把测得的输出量返回到输入端, 使之与输入量进行比较得出偏差信号, 再用这个偏差信号来控制系统运动, 以便随时消除偏差, 从而实现工作台(被控制量)按照指令电位器的规律变化的目的.

从以上举的这些例子可以看出, 反馈控制有两个最主要的特点: 一是有反馈存在, 二是按偏差进行控制. 实现自动控制的装置可以各不相同, 但反馈控制原理却是相同的. 反馈控制是实现自动控制最基本的方法, 并得到了广泛应用. 它不仅可以实现对物理量的恒值控制, 而且还可以实现被控制量复现控制量的变化规律的随动控制.

## 二、开环控制系统与闭环控制系统

工业上用的控制系统, 根据有无反馈作用, 又可分为两类: 一是开环控制系统, 另一是闭环控制系统.

### 1. 开环控制系统

如果系统的输出端和输入端之间不存在反馈回路, 输出量对系统的控制作用没有影响时, 这样的系统就称为开环控制系统. 图 1.5 为一开环速度控制系统. 它根据控制信号的大小和方向来控制负载转速的大小和方向. 原理很简单, 控制信号通过放大器放大, 输出一电流给电液伺服阀, 伺服阀就输出一定流量供给液压马达带动负载以一定的转速运动. 这个系统对被控制量(负载转速)不进行任何检测. 因为没有反馈也谈不上与控制信号进行比较, 以产生偏差信号来对系统进行再控制. 它仅是根据控制信号来对负载进行控制的. 因此, 开环控制系统的精度主要取决于系统的校准精度, 取决于在工作过程中保持校准值以及组成系统的元件特性和参数值的稳定程度.

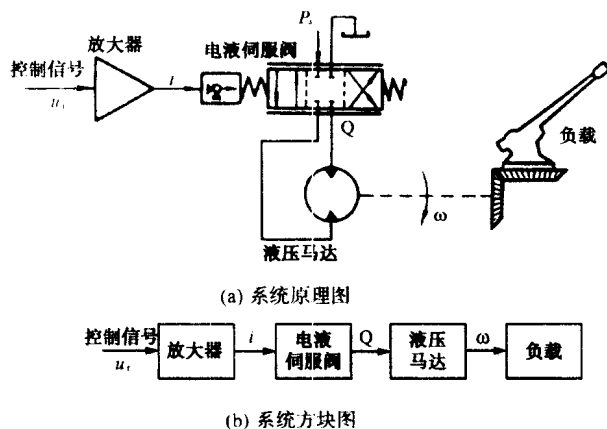


图 1.5 开环速度控制系统

如果系统不存在内部扰动和外部扰动, 以及元件参数比较稳定的话, 开环系统是比较简单并且可以保证足够的精度的. 但当系统存在扰动的情况下, 如果被控制的输出量偏离给定量时, 开环系统就没有纠正的能力了. 如图 1.5 所示的系统, 当负载力矩增加时, 由于阀的流量随负载压力的增加而减小, 以及液压系统内漏损增加等原因, 就会造成液压马达转速的降低. 因为没有反馈比较, 就没有办法自动校正输出量到给定值, 因此使开环系统

精度降低. 为了对其进行补偿就必须借助人工改变输入量.

## 2. 闭环控制系统

凡是系统的输出端与输入端间存在反馈回路, 即输出量对控制作用能有直接影响的系统, 叫做闭环系统. 所以, 反馈系统也就是一个闭环控制系统. 换句话说“闭环”的含意, 就是应用反馈作用来减小系统的误差. 如果对图 1.5 开环控制系统引入反馈回路, 即用测速发电机直接检测被控制量(负载转速), 然后反馈到输入端就构成了闭环控制系统, 如图 1.6 所示.

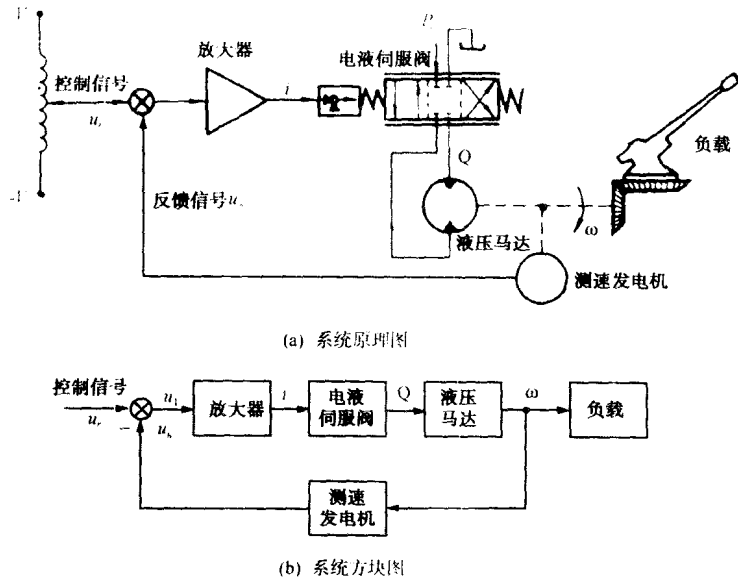


图 1.6 闭环速度控制系统

闭环控制系统突出的优点是精度高, 不管什么干扰只要被控制量的实际值偏离给定值时, 闭环控制就会产生控制作用来减少这一偏差.

但是, 闭环系统也有它的缺点. 由于闭环系统是以偏差消除偏差的, 即系统要工作就必须有偏差存在, 因此这类系统不会有很高的精度的, 也就是说这类系统有其自身的矛盾. 当然, 通过适当措施可以使误差减小到极小. 同时, 由于组成系统的元件的惯性, 传动链的间隙等因素的存在, 如果配合不当, 将会引起反馈控制系统的振荡, 从而使系统不能稳定工作. 因此精度和稳定性之间的矛盾始终是闭环系统存在的主要矛盾.

## 3. 闭环与开环控制系统比较

闭环系统的优点是采用了反馈, 因此对外扰动和系统内参数的变化引起的偏差能够自动地纠正. 这样就可以采用精度不太高而成本比较低的元件组成一个精确的控制系统. 而开环系统却相反, 因为没有反馈, 故没有纠正偏差的能力, 外扰动和系统内参数的变化将引起系统的精度降低.

从稳定性的角度看, 开环系统比较容易建造, 结构也比较简单, 因为开环系统稳定性不是重要问题, 而闭环系统不然, 稳定性始终是一个重要问题. 因为参数如果选得不适当, 将会造成系统振荡, 甚至使系统完全失去控制.

应当指出,如果系统的输入量能预先知道,并且不存在外部扰动时,最好采用开环控制. 如果存在无法预计的扰动,或系统中元件参数不稳定时,采用闭环控制的优点就显得特别突出. 当对整个系统的性能要求比较高时,为了解决闭环控制时精度和稳定性之间存在的矛盾,往往将开环和闭环结合在一起应用,即采用复合控制系统是比较适宜的.

我们主要研究的是闭环控制系统,即着重研究实现反馈控制的理论和方法.

### 三、反馈控制系统的基本组成

#### 1. 反馈控制系统的组成

通过上面反馈控制系统工作过程的分析可以看出:对于一个控制系统来说,不管其结构多么复杂,用途尽管各种各样,但它都是由一些具有不同职能的基本元件所组成. 图 1.7 就是一个典型的反馈控制系统,它表示了这些元件在系统中的位置和其相互间的联系. 作为一个典型反馈系统应该包括检测偏差所必需的反馈元件、控制元件、比较元件以及用以纠正偏差所必须的放大变换元件和执行元件等.

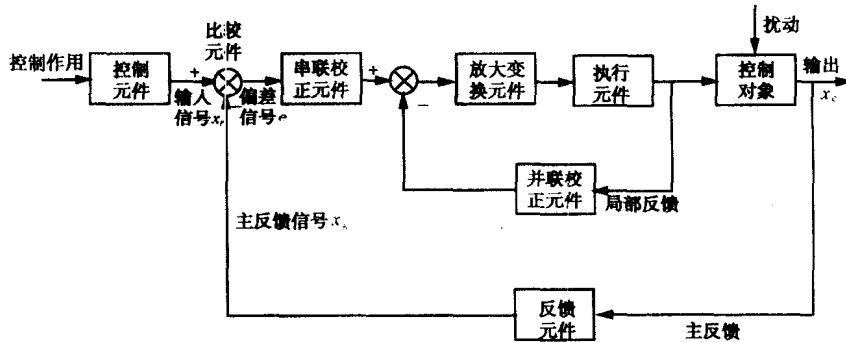


图 1.7 典型反馈控制系统方块图

**控制元件:**主要用于产生控制信号. 引起控制信号变化的原因则称为控制作用. 如图 1.4(a)中的指令电位器就是控制元件, 而控制作用乃是引起电位器滑臂移动的力.

**反馈元件:**它产生与被控制量有一定函数关系的反馈信号. 这种反馈信号可以是被控制量本身, 也可以是它的函数或导数. 如图 1.4(a)中的反馈电位器. 此外, 自整角机、回转变压器以及传感器等测量元件都可以作反馈元件.

**比较元件:**它用来比较控制信号和反馈信号并产生反映两者差值的偏差信号的元件, 如图 1.4(a)中的电位器电桥. 此外, 机械式差动装置, 工作在变压器状态下的自整角机等都可作比较元件.

**放大变换元件:**把偏差信号放大并进行能量形式(电气、机械、液压)转换, 使之达到足够的幅值和功率的元件, 如图 1.4(a)中的放大器、电液伺服阀等.

**执行元件:**根据控制信号的运动规律直接对控制对象进行操作的元件, 如图 1.4(a)中的液压缸. 此外, 常作为执行元件的有液压马达和电动机等.

**控制对象:**简称对象. 就是控制系统所要操纵的对象, 即负载. 它的输出量即为系统的被控制量. 如图 1.4(a)中的工作台等.

以上是构成反馈控制系统的最基本的不可缺少的部分.此外,还有

校正元件:或称校正装置.它是为了改善系统的控制性能而加入系统里的.串联接在系统前向通路内的校正装置称为串联校正装置.接成反馈形式的校正装置称为并联校正装置(或称为局部反馈).

## 2. 名词术语

输入信号(又称输入量、控制量或给定量):它是控制输出量变化规律的信号.而输入量则又广义地泛指输入到控制系统中的信号,如给定信号,也包括扰动信号.

输出信号(又称输出量、被控制量或被调整量):它的变化规律是要加以控制的,应保持与输入信号之间有一定的函数关系.

反馈信号(或称反馈):从系统(或元件)输出端取出信号,经过变换后加到系统(或元件)输入端,这就是反馈信号.当它与输入信号相同,即反馈结果有利于加强输入信号的作用时叫正反馈.反之,符号相反抵消输入信号作用时叫负反馈.直接取自系统最终输出端的反馈叫主反馈.主反馈一定是负反馈,否则偏差越来越大,直至使系统失去控制.除主反馈外,有的系统还有局部反馈,这主要是用来对系统进行校正、补偿或线性化而加入的.

偏差信号(或称偏差):它是控制信号与主反馈信号之差,有时也称为作用误差.

误差信号(或称误差):它是指系统输出量的实际值与希望值之差.在很多情况下,希望值就是系统的输入量.

这里要注意,误差和偏差不是同一概念.只有在全反馈系统中,误差才等于偏差.

扰动信号(又称扰动或干扰):除控制信号以外,对系统输出量产生影响的因素都叫扰动.如果扰动产生在系统内部,称为内扰;产生在系统外部,则称外扰.外扰动也是系统的一种输入量.

## 第三节 自动控制系统的分类

控制系统的种类很多,应用的范围也很广,它们的结构、性能和完成的任务也各不相同,加之研究的角度不同,因此控制系统的分类方法也很多,其中有以下几种主要分类方法:

### 一、按给定量的运动规律来分

#### 1. 恒值控制系统(或自动调节系统)

当给定量是一个恒值时,称为恒值控制系统或自动调节系统.在图 1.4(a)线路中,如果将指令电位器滑动臂固定不动,这时输入信号(从电位计滑臂上引出的电压  $u_r$ )保持恒值.这样就得到一个液压工作台的位置恒值控制系统.生产工艺要求温度、流量、压力等保持恒值的控制系统,如图 1.2 所示的恒温控制系统就属于这一类.在恒温控制系统中,输入信号所保持的恒定值通常叫做控制器的给定值.它和被调整的变量所要求的值是相对应的.当然,给定值随着生产条件的变化也是变化的.但一经调整后,被调整量就应与给定的调整值一致.

对于恒值控制系统,一般设计和分析的重点是研究各种干扰对被控对象的影响,以及从克服干扰的角度对系统进行设计计算.也就是要在存在扰动的情况下,如何将实际的输

出量保持在希望的给定值上。

## 2. 程序控制系统

当控制作用按预先给定的规律(又称程序)变化时,也就是当输入量为已知给定值的时间函数时,称为程序控制系统.如图 1.4(a)线路中,当指令电位器滑动臂利用一个函数凸轮机构带着移动时,从其上面引出的电压便是给定的时间函数,那么图 1.4(a)系统便可以看做是一程序控制系统.机械加工中的程序控制机床就是一个很好的例子.

近年来,由于计算技术广泛地用于控制系统,随之也就产生了一种数字控制系统.图 1.8(a)和(b)就是数字程序控制机床系统的原理图,它们分别做成开环系统和闭环系统.

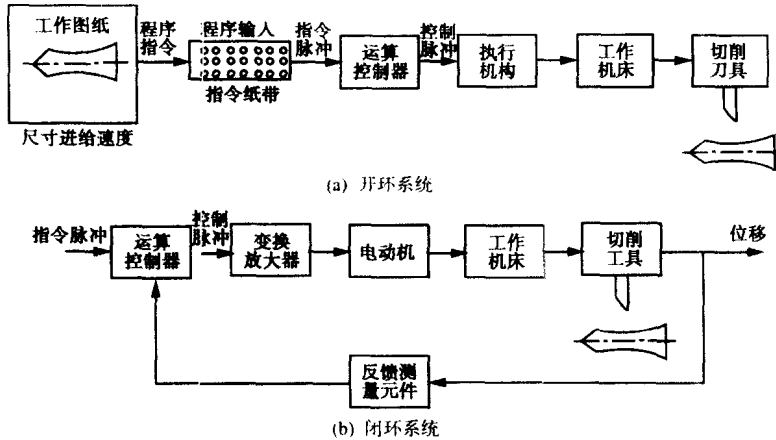


图 1.8 数字程序控制机床

## 3. 随动系统

这种系统的控制作用是时间的未知函数,即给定量的变化规律是事先不能确定的,而要求输出量能够准确、迅速地复现给定量(即输入量)的变化,这样的系统称之为随动系统.对于图 1.4(a),假设指令电位器的滑臂用手或者自动跟随着某一个测量仪器读数的变化而改变时,工作台的位置与滑臂的位置便有一定的函数关系.于是我们就可以认为图 1.4(a)是一个随动系统.随动系统应用极广,如雷达自动跟踪系统,火炮自动瞄准系统,各种电信号的笔记录仪等等.它们的输入量事先都是未知的,而输出量有的是机械位移,有的是速度、加速度或力.像这样具有机械量输出的随动系统通常又称为伺服系统.

图 1.9 为一火炮自动瞄准随动系统的结构方块图.工作原理是:指挥仪的同步传信仪

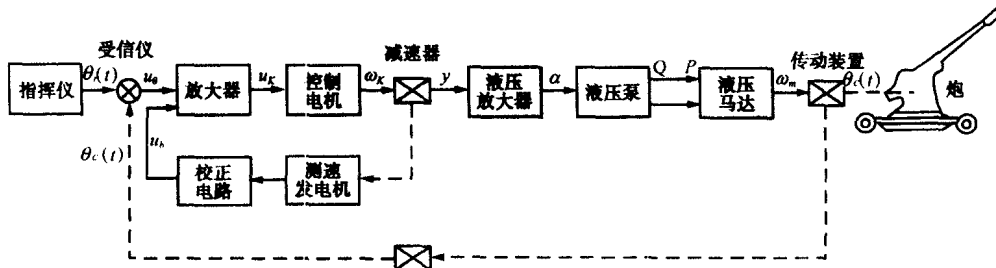


图 1.9 火炮自动瞄准随动系统



把雷达测到的运动目标的参数(方位角或高低角  $\theta_r(t)$ )与火炮的实际位置  $\theta_c(t)$ 不断地在受信仪中进行比较.当火炮没有对准目标时,即产生一失调角  $\theta(t) = \theta_r(t) - \theta_c(t)$ ,由受信仪输出一个与失调角  $\theta(t)$ 成比例的电压  $u_\theta$ ,经放大器放大后送给控制电机,控制电机通过减速器带动液压放大器滑阀,经液压放大器将力放大后拖动液压泵的变量机构改变斜盘的转动方向和角度  $\alpha$ ,则液压马达按一定方向和转速旋转.通过传动装置,一方面带动火炮进行自动瞄准跟踪,另一方面带动受信仪轴转动,消除与同步传信仪之间的失调角.失调角等于零时,火炮即处于瞄准好目标的状态.实际上,指挥仪是不断地发出指令,火炮也是在不停地跟踪.这是系统加了校正后的工作情况.以后我们就会知道像这样的系统未经校正是不能够工作的.

在随动系统中,由于输入信号是随时变化的.系统的输出量也必须迅速准确地跟随给定目标而变化.因此,一般情况下,研究随动系统经常着重于跟随的快速性.为了设计得更加符合实际,需对输入信号的变化规律做一大概分析.如果输入信号变化较快,执行机构就应该有足够的功率,以保证不失目标;如果被跟踪的目标变化较慢,系统就应着重考虑跟随的平稳性等等.

## 二、按系统的反应特性分

### 1. 线性系统和非线性系统

(1) 线性系统.自动控制系统是一个动态系统,它的工作状态和性能一般可用微分方程或差分方程来描述.当系统各元件输入-输出特性是线性特性,系统的状态和性能可以用线性微分方程(或差分方程)来描述时,则称这种系统为线性系统.线性系统中各元件的静特性必须是线性的,如图 1.10(a)所示.线性系统的特点是可以应用叠加原理.

当微分方程或差分方程的系数为常数,不随时间变化的系统称为线性定常系统.当微分方程或差分方程的系数是时间的函数时,则系统称为线性时变系统.

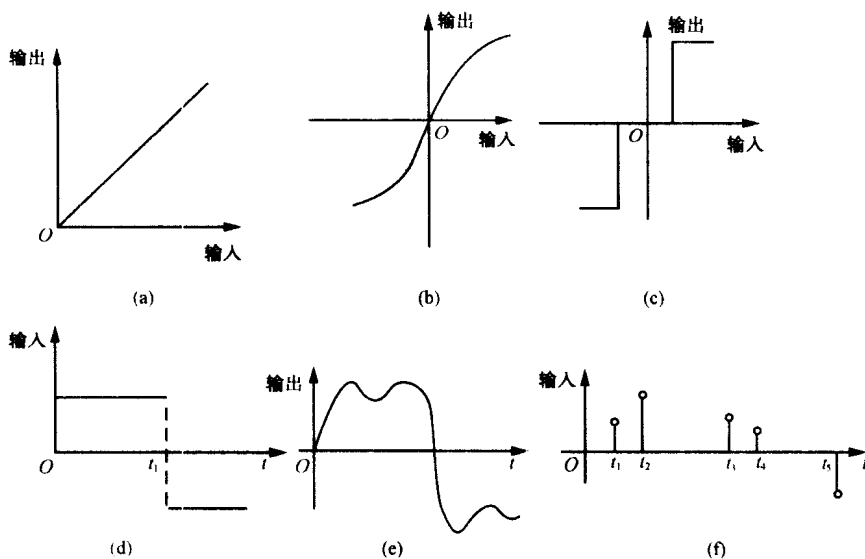


图 1.10 各种不同系统的输入-输出特性