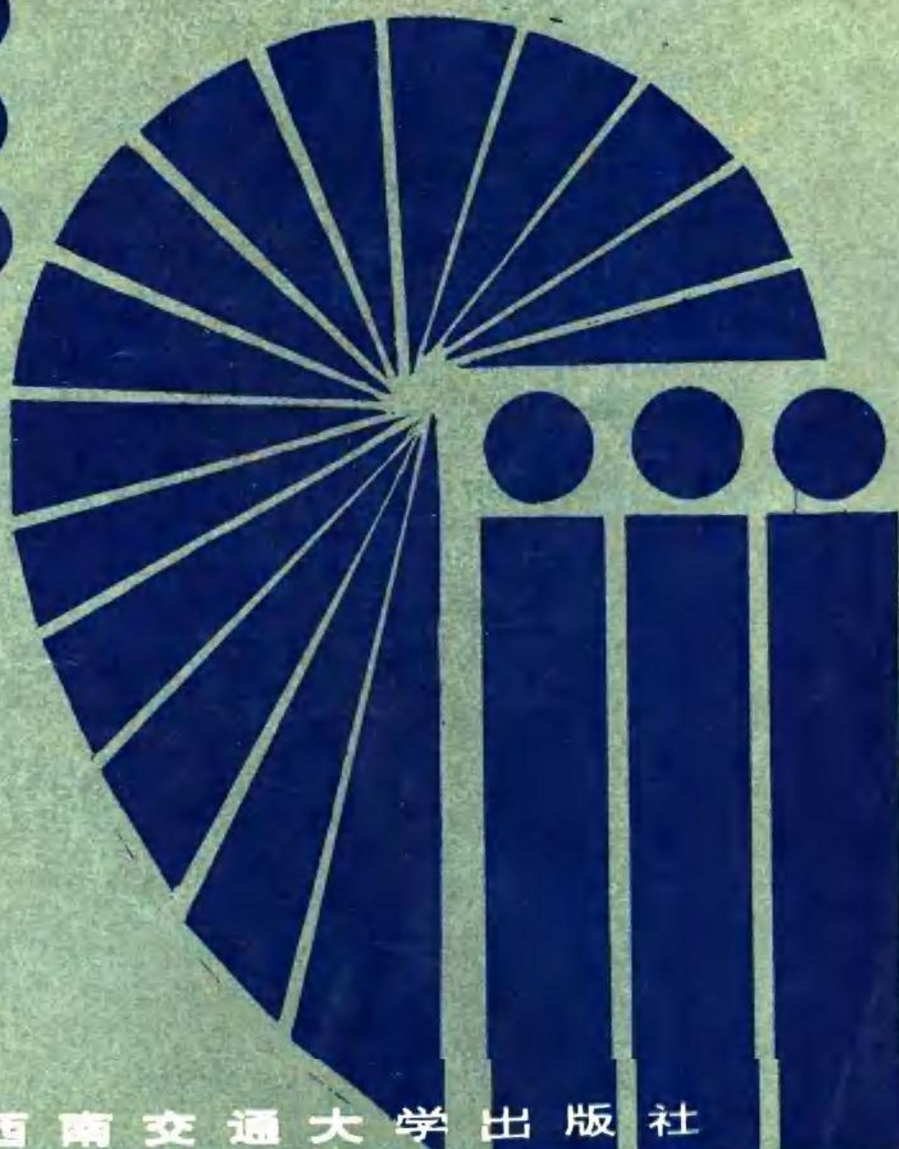


控制工程基础

于 广 汉 主 编



TB114.2
Y495

西南交通大学出版社

TB114.2

7425

0626799

控 制 工 程 基 础

大连铁道学院 于广汉 主编

西南交通大学出版社



登记证号: (川) 018 号

6 6 8 8 8 8

内 容 简 介

本书介绍经典控制工程的基本理论, 线性连续反馈控制系统的分析和综合、校正方法。内容包括控制与控制系统的一般概念、控制系统的数学模型建立方法、时域分析方法、频率特性法和综合、校正的基本方法。每章均附有例题和习题。

本书是工科大学非电专业和大专工业自动化等专业的教材, 也可供有关工程技术人员使用。

控 制 工 程 基 础

于广汉 主编

西南交通大学出版社出版发行

(四川 成都九里堤)

四川省新华书店经销

西南交通大学出版社印刷厂印刷

开本: 787 × 1092 1/16 印张: 10.625

字数: 195 千字 印数: 1—3000 册

1991 年 12 月第 1 版 1991 年 12 月第 1 次印刷

ISBN 7—81022—271—6/T·075

定价: 2.80 元

前 言

“控制工程”是阐明和研究自动控制共同规律的一门技术科学，它以自动控制系统为研究对象。控制工程技术是自动化技术的主要分支，各种自动控制系统是工业生产设备自动化不可缺少的组成部分，自动控制系统的性能好坏直接关系着产品质量和生产率的提高。因此，掌握控制工程这门技术科学，改善自动控制系统的性能，是许多工程技术人员面临的课题。并且，控制工程的关于数学模型、工程分析计算方法和一般规律等主要内容，不仅是分析、综合(设计)自动控制系统的基本理论，也是研究各种动力学系统动态性能的有效方法，它已成为大多数工程技术人员的一种必备的工程技术基础知识。

本书是根据1989年7月在兰州召开的铁路高等学校《计算机、自动控制、工业电气自动化教学指导委员会》会议的精神和会议制定的1989—1990年教材编写规划而编写的。

本书介绍自动控制、自动控制系统的一般概念和基本原理以及数学模型的建立方法等基础知识，着重介绍经典线性控制工程中常用的时域分析方法、频域分析方法以及综合、校正的基本方法。

本课程是具有一般方法论性质的技术基础课。为了使学生对基本的数学原理有一个清晰的理解，本书保持了经典控制工程的基本理论体系，并通过足够的举例与习题，培养学生分析和解决实际问题的能力；基于“精选内容，保证基础”的原则，力求主干明析，重点突出，避免篇幅过大；尽量做到明确易懂，深入浅出，以期便于自学，也便于适应本课程多种学时的教学需要。

本书是工科大学非电专业与大专工业自动化等专业的试用教材。本书的全部内容可以在50~60学时内讲完，通过适当地选取讲授课题，可以用作30~60学时的任何一种学时的教材。舍去标有*的小节不影响后续部分的学习。

参加本书编写工作的有：大连铁道学院于广汉（第一、五章）、华东交通大学易宜连（第二章），长沙铁道学院樊晓平（第三章），西南交通大学张德安（第四章）。全书由于广汉同志主编。

本书由兰州铁道学院郭光辉同志主审。下列七位专家教授（按姓氏笔划顺序）评审了书稿：中国社会科学院研究生院张启人；南方冶金学院陈惠民；长沙铁道学院罗大庸；北方交通大学贺允东；西南交通大学荣德善；南方冶金学院唐淑雪；西南交通大学出版社程美雯。他们对书稿提出了很多宝贵意见，谨在此致以衷心的感谢。

由于时间仓促和水平所限，书中难免还有缺点，敬请读者给予指正。

编 者

1990年9月

目 录

第一章 控制与自动控制系统的一般概念

第一节	引 言	1
第二节	控制的基本方式	2
第三节	自动控制系统的分类	5
第四节	对控制系统的性能要求	8
第五节	关于控制工程	9
习 题		10

第二章 系统的数学模型

第一节	系统的微分方程	12
*第二节	非线性微分方程的线性化	19
第三节	拉普拉斯变换	21
第四节	系统的传递函数	27
第五节	典型环节及其传递函数	31
第六节	系统的动态结构图	36
第七节	相似系统	50
本章小结		51
习 题		52

第三章 时域分析法

第一节	概 述	55
第二节	一阶系统的分析	57
第三节	二阶系统的分析	58
*第四节	高阶系统的动态分析	69
第五节	反馈系统的稳定性分析	73
第六节	控制系统的稳态误差	81
本章小结		88
习 题		88

第四章 频率特性法

第一节	频率特性的基本概念	91
第二节	极坐标图的绘制	95

第三节	对数坐标图的绘制	99
第四节	奈奎斯特稳定判据	106
第五节	开环频率特性和系统时域响应性能的关系	114
*第六节	闭环频率特性和系统阶跃响应性能的关系	122
*第七节	频率特性的实验测试	128
本章小结		130
习 题		130

第五章 控制系统的校正

第一节	控制系统的设计及校正	133
第二节	串联校正	135
*第三节	反馈校正	148
*第四节	顺馈校正	152
本章小结		155
习 题		155

附录 1	常用拉普拉斯变换对照表	157
附录 2	常用校正装置①	158
附录 3	习题参考答案	160
参考文献		163

第一章 控制与自动控制 系统的一般概念

本章从控制的任务、控制的方式、控制系统的分类和控制过程等方面阐述控制与自动控制系统的一般概念。并对控制工程研究和处理问题的方法做一说明。

第一节 引言

控制工程在现代工程和科学的发展进程中起着极为重要的作用。太空航行、人造卫星等高新技术中，无不渗透着控制工程的辉煌成果。在工农业生产、交通运输、国防建设、科学研究及日常生活等各个领域，控制技术也都获得了广泛的应用，前景是十分诱人的。

所谓控制，是指由人或控制装置使受控对象按照一定目的来动作所进行的操作。“动作”是指受控对象的“状态”的变化，“状态”是用物理参量来表征的。“按照一定目的来动作”，就是指表征受控对象状态的物理量的变化符合为某种目的而给定的规律。

在工业生产过程中，为了生产正常进行、提高产品的质量和劳动生产率，必须按照预定的要求对机器、设备或生产过程进行操作。例如，必须使连轧机的各轧辊的既定转速保持不变；必须使机床的工作台或刀架的位置准确地跟踪指令进给；使热处理炉的炉温保持某个恒定值或按一定的规律变化，等等，所有这些操作就是控制。其中，轧辊、工作台或刀架、热处理炉就是受控对象。而转速、位置、炉温是分别表征这些机器设备工作状态的物理量，称为被控量。要求这些被控量所应保持的数值或变化规律，称为这些被控量的希望值（或希望的被控量）。而操作或控制的任务就是使受控对象的被控量等于或按一定精度符合希望值。

控制的任务如果是由人来完成，则称为人工控制。如果人不经常直接参与，而是用控制装置来完成，则称为自动控制。控制装置和受控对象的组合，称为自动控制系统。

任何实际运行的物理系统都是因果系统，输出（响应）是输入（激励）引起的后果。自动控制系统的输入称为给定量（或参考输入量），输出就是被控量。给定量一般由人事先设定或由另外的自动装置给定。各种自动控制系统的共同点是：不需要人经常直接参预，而能按照给定量自动地做出相应的反应，使被控量等于或按一定精度符合希望值。而周围环境的各种因素以及系统本身的各因素会时常干扰它，给系统以附加输入或使系统的特性发生变化，实现自动控制需要有相应的技术科学基础。控制工程技术科学常称为自动控制技术科学，它研究的中心问题就是如何抵消或削弱这些因素的影响，改善控制精度，而实现自动控制的任务。

第二节 控制的基本方式

完成控制任务的原则方法、基本方式可分为两种：即开环控制与闭环控制。

一、开环控制

图 1—1 是直流电动机转速的开环控制系统。控制的任务是使负载以恒转速 n 。（希望值）运行。受控对象是电动机与负载，被控量是转速 n ；电位器的滑臂位置 r 是给定量。

系统的控制原理：电动机的激磁电流恒定时，转速 n 受电枢电压 u_a 。（称为控制量）的控制。当滑臂位置 r 一定时，电位器的输出电压 u_r 也一定，功率放大器的输出电压 u_a 。（即电枢电压）便一定，电动机就会带动负载以一定的转速 n 转动。改变 r ， n 就随着改变。当系统的特性正常并且没有其它附加输入时，被控量 n 与给定量 r 有确定的对应关系。要求负载以恒转速 n 运转，只要事先把滑臂置于相应的位置即可。

可以看出，这个系统的控制装置与受控对象之间只有单方向的控制作用而没有反向联系，被控量不对系统的控制作用发生影响，这种控制方式称为开环控制方式。

如果将系统的每个元件用方框表示并标注其名称或功能，用箭头线段表示信号（系统中的物理量，如转速、电压、位置等也称为信号）传递的通道与方向，那么就得到系统的方块图或功能方块图。图 1—1 系统的方块图如图 1—2 所示。方块图能更清楚的表明系统中各种元件间的相互关系与信号传递的情况，对于了解系统的控制方式和控制原理是一种简明的方法。

开环控制从原理上说是存在缺点的。当系统受到干扰（例如图 1—1 系统电动机负载的变化、放大器的电源电压波动或工作过程中系统的特性参数发生变化），会直接波及被控量（如转速），使被控量不等于希望值而出现偏差，开环控制系统无法自动消除偏差。因而，控制精度难于保证。

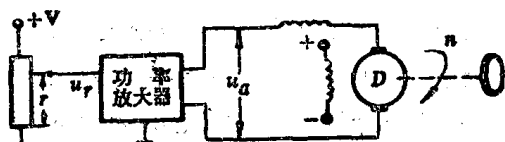


图 1—1 直流电动机转速开环控制系统

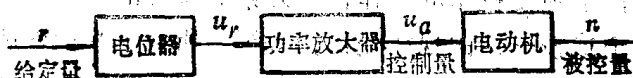


图 1—2 直流电动机转速开环控制系统的方块图

提高开环控制的精度的措施之一，是常应用具有一定抗干扰能力的或较精密的元件。例如如图 1—3 所示是依据开环控制方式设计的程序控制机床，由程序编码产生的脉冲信号经过分配器控制步进电机的转角，再经过精密传动，控制工作台运动。由于采用了数字脉冲控制元件，避免或降低了干扰的影响，系统的被控量（工作台的位移）具有较高的精度。

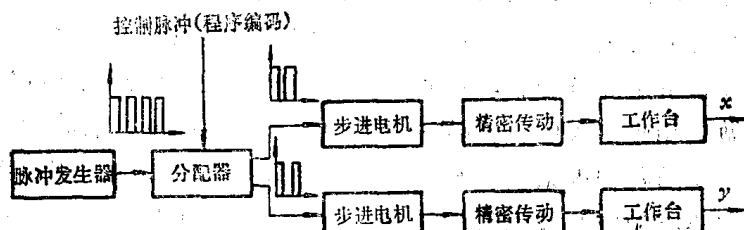


图 1—3 程序控制机床方块图

开环控制是根据人们对控制行动的可能结果的认识和把握程度而采取的控制方式，一旦

行动起来，无需顾及控制的结果。一般来说，开环控制系统的结构简单，在给定量与被控量之间的关系已知的情况下，如果干扰很弱，或对系统中可能出现的干扰有办法抑制，或对控制精度要求不高时，可采用开环控制方式。如自动洗衣机、自动车床、线切割机、产品自动线、顺序控制器等等，都是开环控制的实例。

二、闭环控制

解决开环控制精度的根本措施，是使加到受控对象上的控制量（如图 1—1 系统的电枢电压 u_a ）不是一个预定的量，而是一个能抵消干扰影响的变化的量。也就是必须对直接作用于受控对象的控制量进行修正以补偿干扰对被控量的影响。虽然干扰通常是不能预测的，但是干扰影响下的实际的被控量与希望值之间的偏差就表征了干扰的影响。因此，可以用偏差对控制量不断地进行调整，以便获得所希望的被控量。按这个方案构成自动控制系统，需要包含以下两个方面的元件。

检测偏差方面的元件：① 给定元件，用来引进给定量，给出参考输入量（或称基准输入量），以表征希望值（希望值是系统输出的目标，与被控量是同量纲的物理量，一般来说，它不能直接引入系统作为基准）；② 检测元件，用来测量被控量。测量结果是被控量的表征值，与参考输入量的量纲应相同，以便比较；③ 比较元件，用来比较上述被控量的表征值与希望值的表征值，得出偏差量。

纠正偏差方面的元件：① 放大及变换元件，用来把微弱的偏差信号的幅值和功率放大，以及变换为适于执行元件工作的信号；② 执行元件，用来对受控对象进行操作，以纠正偏差。它接受来自放大变换元件的信号，能改变直接作用于受控对象引起被控量变化的控制量。

图 1—4 就是根据上述控制方案构成的一种直流电动机转速闭环控制系统，转速的希望值为 n_0 。

图中，测速发电机 CF 是检测元件，其输出电压 u_f 正比于电动机 D 的实际转速 n ， u_f 是实际转速 n 的表征值；电位器 R_1 为给定元件，其输出电压 u_r 正比于滑臂位置 r ， u_r 的设置值与电动机 D 的希望值 n_0 相对应，即 u_r 的设置值代表了转速的希望值 n_0 ， u_r 是参考输入量， r 是给定量； u_r 与 u_f 两电压反接线路相当于比较元件，完成减法运算，输出电压 $\Delta u = u_r - u_f$ ，相当于实际转速 n 与希望值 n_0 的偏差量；伺服电机 SD 及减速器是执行元件；放大器 K 是放大元件，它将弱小的偏差电压 Δu 进行放大，使放大后的信号 u_1 具有足够的能量，并选择适当的极性去驱动 SD 。

系统的控制原理：转速 n 恰好等于希望值 n_0 时，经事先整定，这时 $u_f = u_r$ ，即 $\Delta u = 0$ ，伺服电机 SD 不动；如果干扰使转速 n 低于 n_0 ，则有 $u_f < u_r$ ，偏差信号 $\Delta u = u_r - u_f > 0$ ，偏差信号经放大后使 SD 产生角位移，并经过减速器带动电位器 R_1 的滑臂朝

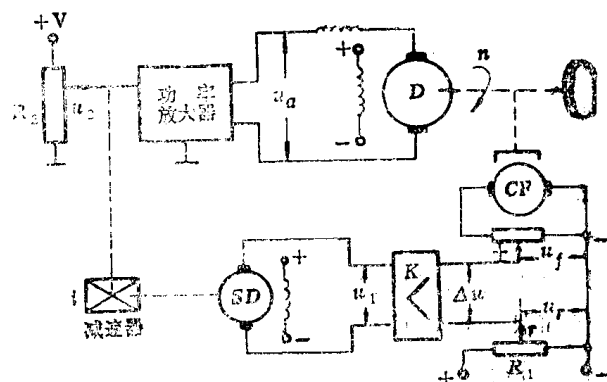
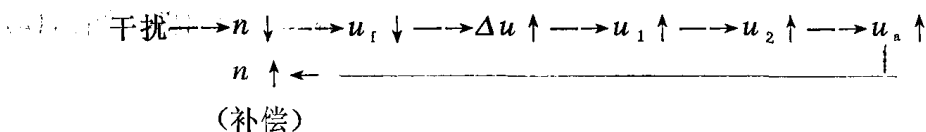
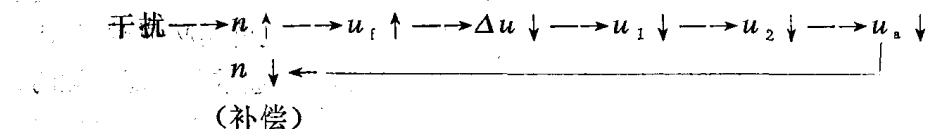


图 1-4 直流电动机转速闭环控制系统

增大电枢电压 u_a (控制量) 的方向移动, 使转速回升, 直到重新等于 n_0 (即 $u_f = u_r$) 为止。这个控制过程可示意为:



干扰使转速 n 高于 n_0 时, 控制过程为:



由此可以看出, 系统通过检测转速 n (表征值为 u_f) 对希望值 n_0 (表征值为参考输入量 u_r) 的偏差, 用检测到的偏差 Δu 去修正控制量 u_a , 以补偿或抵消干扰对被控量 n 的影响, 而达到消除偏差的目的。称为偏差控制方式。控制的任务就是使 $u_f = u_r$ 。

而偏差信号是对被控量转速 n 不断测量转换为 u_f , 并反馈到系统的输入端与参考输入量 u_r 相减, 即负反馈得到的。所以这种控制方式也称为反馈控制方式。

而从系统内部信号的传递看, 信号传递的路径是闭合的。因此, 又称为闭环控制方式。

显然, 控制系统不仅有能量损耗, 而且是有能源的, 放大器与电动机都具有外部能源。

图 1—4 系统的功能方块图如图 1—5 所示。图中 $\otimes$ 表示比较元件, 其旁边的负号表示负反馈。从给定元件到被控量自左至右的通道称为前向通道, 被控量到反馈信号自右至左的通道称为反馈通道。

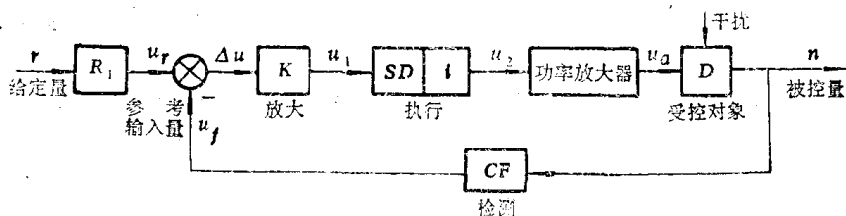


图 1—5 电动机转速闭环控制系统的功能方块图

以上就直流电动机恒转速控制所介绍的按偏差、负反馈、闭环控制的方式或基本原理, 对于任何技术部门中受控对象的任何其它物理量的自动控制来说, 是具有普遍意义的。一般来说, 凡是在控制装置与受控对象之间既有顺向作用, 又有反向联系, 被控量对控制作用有直接影响的控制方式, 称为闭环 (或反馈、偏差) 控制方式。

闭环控制方式从原理上提供了消除或减小因负载、环境和系统参数等无法预测的变化对系统造成的影响的可能性, 只要被控量出现偏差, 系统就能重新组织自己的运动纠正或消除偏差, 提供了实现高精度控制的可能性。是控制工程中最基本的控制方式, 在工程中获得了广泛的应用。控制工程把闭环工程控制系统作为主要的研究对象。

在有些系统中, 将开环和闭环方式结合在一起, 称为复合控制。它能取得很好的控制效果, 将在第五章中具体介绍。

本书重点讨论闭环控制系统, 以后所讲的控制系统都是指闭环控制系统。

第三节 自动控制系统的分类

自动控制系统可以从不同的角度分类，每一种分类的方法都代表一定的特点。

一、按给定量（或参考输入量）的特征分类

（一）恒值控制系统

恒值控制系统指给定量为常值（或者随时间缓慢地变化）。这种系统的基本任务是保证在任何扰动作用下，使被控量保持恒定的希望值，基本控制过程是抗扰过程，也称为自动调节过程（只在需要重新调定给定值时才出现随动控制过程）。这种系统也常称为自动调节系统。工业中恒温、恒速、恒压、恒定液位、恒定电流、恒定电压、恒定湿度等自动控制系统都属这一类。图 1—4 系统就属于这类系统。下面再举一例，是纯机械的自动调节系统。

图 1—6 所示为蒸汽机调速系统。蒸汽机要求在额定转速 n_0 下运行，转速是被控量。由于离心飞球本身的重量和弹簧力，两个离心飞球有往下摆的趋势，而由于和主轴转速有关的离心力作用，它们要往上摆。蒸汽机主轴以额定转速 n_0 运行时，它们处于一个平衡状态，离心飞球的摇杆有一定的摆角，杠杆有相应的位置，输入蒸汽的阀门开启量也一定。

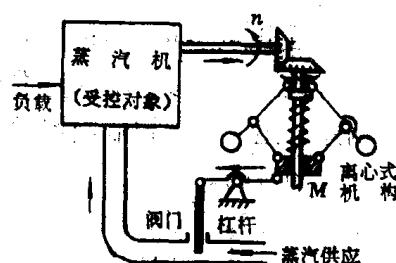


图 1—6 蒸汽机调速控制系统

调节的原理：当蒸汽机的负载增加时，转速下降，离心力下降飞球的摆角减小，套筒 M 下移并直接移动杠杆，使阀门开启量增加，输入蒸汽流量增加，使驱动力增加从而转速回升，直至驱动力增加到和阻力相适应，转速接近并略低于 n_0 ，重新达到稳定运行状态；反之，负载减小时，转速增大，使蒸汽机在接近并略高于 n_0 的转速下重新达到稳定运动。

这个系统在变动负载作用下，能使蒸汽机转速恢复到接近原来的转速 n_0 ，但不能完全回到原来转速。以负载增加后来看，要想使转速保持原来的数值 n_0 ，必须补偿驱动力。只有转速略低些才能使阀门开启量和蒸汽流量增加些，才能增加一部分驱动力来补偿、平衡增加的阻力。这种不能维持被控量完全不变的总是有一定误差的控制系统，称为有差系统。显然，杠杆的放大倍数越大，误差就可以越小，仍可满足控制精度要求。

（二）随动系统

随动系统指给定量是时间的未知函数，给定量的变化规律是事先不知道或不需要的。这种系统的基本任务是保证被控量随着给定量的变化而变化（自然也应能抗干扰），也叫做跟踪系统。被控量是机械量的随动系统又称为伺服系统。运动目标的自动跟踪、瞄准系统、带钢飞剪机的控制系统、自动测量仪器系统等都属于这一类。图 1—7 (a)、(b) 所示机床工作台位置控制电液伺服系统是这类系统的一个实例。

控制的任务是使工作台的位置按照给定电位器任意给定的规律变化。受控对象是工作台，被控量是它的位置 x_0 ，由反馈电位器转化为反馈信号、电压 u_f 。给定量是给定电位器滑臂的位置 x_r ，并转化为参考输入量、电压 u_r 。两个相同的线性电位器接成桥式电路为比较元件，电桥输出电压 $\Delta u = u_r - u_f = K(x_r - x_0)$ ； $K = E/x_0$ 为电位器增益。电放大器和电液伺服阀是放大变换元件。液压缸是执行元件。

系统的控制原理：当给定电位器滑臂的位置 x_r 和反馈电位器滑臂的位置 x_c 一致时，经事先整定，电桥输出偏差电压 $\Delta u = 0$ ，电放大器输出电流为零，电液伺服阀处于零位没有流量输出，工作台不动；当给定电位器滑臂的位置发生变化时，譬如突然向右移动 Δx_r ，在工作台位置变化之前瞬间，电桥输出偏差电压 $\Delta u = K \Delta x_r$ ，该偏差电压经放大变为电流信号控制电液伺服阀输出流量为 q 的压力油，推动活塞与工作台右移，直到工作台位移等于给定电位器滑臂位移 Δx_r 时，即被控量完全复现给定量，此时 $\Delta u = 0$ ，伺服阀恢复零位不再输出压力油，工作台便停止运动，如果给定电位器滑臂位置不断改变，则工作台位置也跟着不断变化。

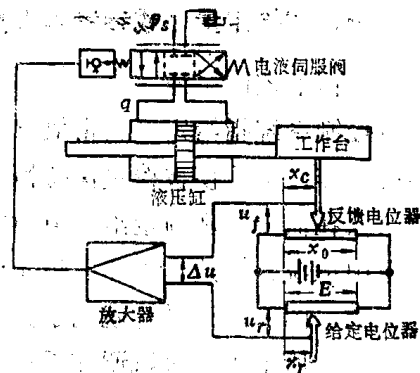


图 1-7(a) 位置控制电液伺服系统

可以看出，随动控制过程仍是不断地对被控量进行检测，与参考输入量进行比较得出偏差，偏差产生控制量控制受控对象运动随时消除偏差，从而实现被控量跟随给定量的变化规律而变化的目的。

随动系统的特点是：给定量就是希望值。它的被控量总是相当精确地跟随给定量的变化而变化，或者说它的被控量总是复现给定量；具有功率放大作用，可以用功率很小的给定信

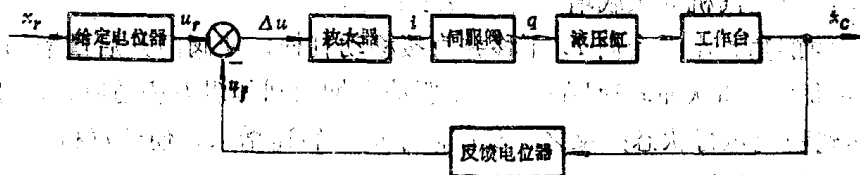


图 1-7(b) 位置控制电液伺服系统的方块图

号（例如轻轻地移动给定电位器的滑臂）控制功率很大的受控对象（例如工作台），选用大功率的功放装置和执行元件即可。

（三）程序控制系统

程序控制系统指给定量是时间的已知函数。机械加工工业的过程控制，广泛应用着程序控制系统，仿形机床、数控机床等都属于这一类。图 1-8 是炉温程序控制系统，金属工

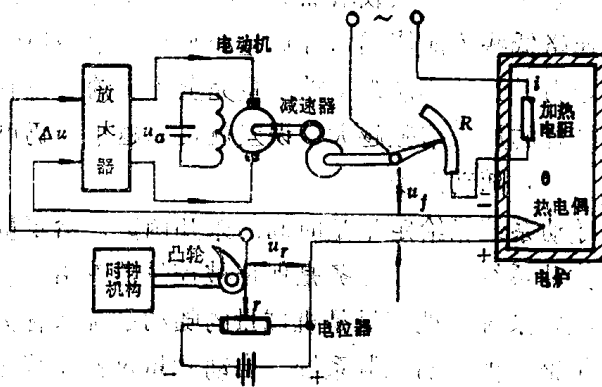
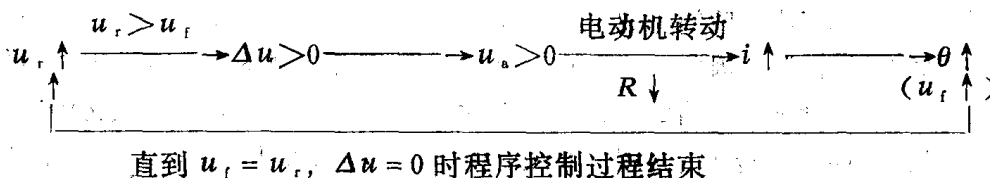


图 1-8 炉温程序控制系统

件的热处理需要炉温 θ 能随时间 t 按照一定的规律 $\theta_0(t)$ 变化。图中热电偶是把实际的炉温变换为反馈电压 u_f 的检测元件。线性电位器的输出电压 u_r 是参考输入量，电压 u_r 随时间 t 的变化规律 $u_r(t)$ 或线性电位器的滑臂随时间的移动规律 $r(t)$ ，都要像希望的炉温随时间的变化规律 $\theta_0(t)$ 那样（只具有一定的比值关系）。电位器的滑臂也是凸轮机构的从动件，根据 $r(t)$ 便可制成凸轮。时钟机

构带动它们运动来实现程序控制。比较线路、放大与执行元件已不难看出。改变串联电阻 R 的阻值, 加热电流随之变化, 炉温也就随着变化。

程序控制系统的控制原理与随动控制系统的原理相同, 炉温自动地追随着 u_r 的变化而变化, 系统在随动状态中工作, 总是在为检测偏差、消除偏差而进行工作着。其控制过程可示意为:



二、按系统的反应特性分类

(一) 线性系统与非线性系统

同时具有叠加性与均匀性的系统称为线性系统。所谓叠加性是指当有几个输入同时作用于系统时, 系统的总输出等于每个输入单独作用所产生的输出之和。所谓均匀性 (或称齐次性) 是指当输入乘以某常数时, 输出也倍乘相同的常数。叠加性与均匀性也就是: 如果对于给定的系统, $r_1(t)$ 、 $c_1(t)$ 和 $r_2(t)$ 、 $c_2(t)$ 分别为两对输入与输出, 则当输入是 $ar_1(t) + br_2(t)$ 时 (a 、 b 分别为常数), 系统的输出为 $ac_1(t) + bc_2(t)$ 。

不满足叠加性或均匀性的系统, 称为非线性系统。

(二) 定常系统与时变系统

如果系统的参数不随时间而变化, 则称为定常系统 (或非时变系统)。定常系统的性质不随时间变化, 或者说, 在同样的起始状态之下, 它具有响应的形状不随输入信号施加的时间不同而改变的特性, 如图 1—9 所示。

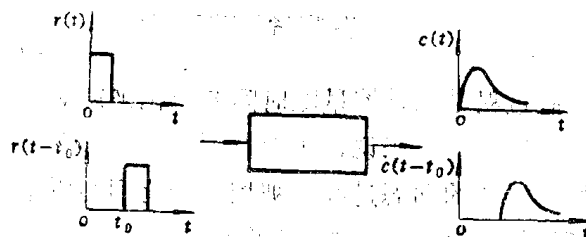


图 1—9 定常系统的输入和输出

如果系统的参数随时间而变, 则称其为时变系统。

三、按系统中所传递的信号的性质分类

(一) 连续系统

如果系统各元件的输入、输出信号都是时间的连续函数时, 则称为连续系统。例如图 1—4 直流电动机转速控制系统。

(二) 离散系统

系统中只要有一个地方的信号是脉冲信号或数码时, 就称为离散系统。例如图 1—3 程序控制机床系统。用微型计算机、数字电子计算机做为控制装置的数字控制系统也属于离散系统。

本书以连续线性定常控制系统为研究对象。

第四节 对控制系统的性能要求

自动控制系统的控制过程概括来说,或是随动过程,或是抗扰(调节)过程,或是随动与抗扰同时进行,都是检测偏差纠正偏差的过程。

实际的控制系统是动态系统,总是包含有一些储能元件,如机械部分的质量,电气元件中的电感、电容、电炉的热容量等等。储能元件对信号的变化体现为储存能量的变化,而能量的储存与释放都不可能在瞬间完成,当输入突然改变时,相应的输出需经过一个渐变的过渡过程,即具有“惯性”。因此,一个处于稳态 c_0 的闭环控制系统,当扰动 n 或给定量 r 发生变化,譬如突然增加某一值时,系统的调节或随动不可能瞬间完成。系统的各元件的工作过程是各种形式能量的转换的过程,系统的内部信号是沿着闭环周而复始循环地渐变地传递过程。系统的响应即被控量 c 也只能是渐变或连续变动,经过一个变动的过程才可能又趋近于或恢复到原来的稳态 c_0 。(如图1—10a中的过程②、③),或者才可能稳定地跟随新的给定量 $r(t)$ 运行(如图1—10b中的过程③、④)。总的来说,控制系统的调节或随动是个过渡过程。

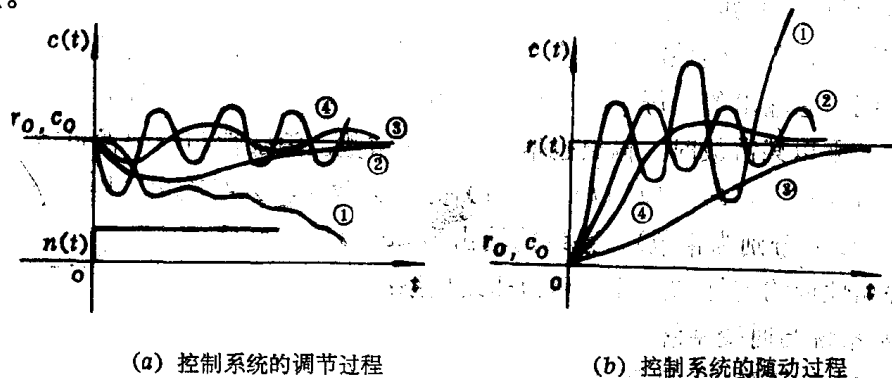


图 1-10

控制过程是以被控量随时间的变化来表征。被控量随时间变化的图形称为控制过程曲线或响应曲线。一般来说,可能有图1—10所示的几种形式。被控量处于变化状态的过渡过程也称为系统的动态过程,被控量变化到与原来的稳态值(如图1—10a中的过程②、③)或与新的给定量(如图1—10b中的过程③、④)的偏差小得可以忽略的情况以后,达到相对稳定的状态,称为系统达到稳态或静态。一个控制系统的动态过程的形式,取决于控制装置与受控对象之间,各功能元件的特性参数之间的匹配情况。

响应曲线表明了一个控制系统执行控制任务的优劣程度如何。显然,从控制的任务看,响应曲线越逼近希望值越好。工程上通常以系统的响应曲线的下述情况来评价系统的性能。

一、稳定性

稳定性是指系统重新恢复稳态的能力。若一个系统的响应随时间的推移而发散,则称这个系统是不稳定的。反之,对于线性系统,若响应随时间的推移,能够或者以一定精度收敛到希望值,则称该系统是稳定的。不稳定的系统受扰后或给定量变化以后不能重新恢复稳态,如图1—10(a)、(b)中过程①所示,就不可能完成调节或随动的任务。稳定是控制系统正常工作的先决条件。稳定性对于闭环控制系统是个重要课题。

对于常见的响应曲线为衰减振荡形式的稳定系统,响应曲线的振荡程度表征了该系统的稳定程度(称为相对稳定性)。振荡的振幅过大可能会使系统元件损伤,甚至毁坏。

二、快速性

快速性是指稳定系统响应的动态过程的时间长短。动态过程时间长，说明系统出现欠偏差的时间长，响应迟缓。

三、准确性

准确性是指控制系统进入稳态后，跟踪给定信号或纠正扰动信号影响的准确度。通常是用系统的被控量和希望值之间的误差随时间无限推移的极限值（称为稳态误差）来评价。

相对稳定性和快速性反映了系统的动态性能，稳态误差反映了系统的稳态性能。对一个控制系统的基本要求是：系统必须是稳定的，动态性能与稳态性能应满足要求。

一个控制系统的稳定性、快速性、准确性是相互矛盾与相互牵连的，改善了准确性可能会使稳定性很差，提高了快速性可能会使相对稳定性不满足要求。

自动控制系统是在变动中发挥控制作用的，研究响应的全过程才能全面了解系统的性能。控制工程既关心控制系统的稳态性能，也关心系统的动态性能。分析和改善控制系统的性能是本课程的主要内容。

第五节 关于控制工程

一、研究的对象、中心问题和主要内容

“控制工程”是阐明和研究自动控制共同规律的一门技术学科。

控制工程研究的主要对象是自动控制系统。研究的中心问题是系统在控制过程中的性能。学科的主要内容是自动控制系统的性能分析与设计（综合）的方法。

所谓控制系统的分析，是指给定一个具体的系统，从理论上对它的动态性能和稳态性能进行定性分析和定量估算。

所谓控制系统的设计，是指给定对系统的动态和稳态性能要求，并根据已知的控制对象，确定控制装置的结构和参数。

根据自动控制技术发展的不同阶段，控制工程分为“经典控制工程”和“现代控制工程”两大部分。前者主要以传递函数为基础，研究单输入、单输出一类自动控制系统的分析和设计问题，由于其发展较早现已臻成熟，后者主要以状态空间法为基础，研究多输入、多输出、变参数等控制系统的分析和设计问题，它在随着科技的发展向前发展着。本书内容属于经典控制工程，重点讨论连续定常线性反馈控制系统的分析和设计的理论根据和方法，它是控制工程的基础，也是当前应用较为普遍的内容。

二、研究和处理问题方法上的特点

控制工程的学科性质属于技术科学，不属工程技术，是指导实现“自动控制”技术的基本理论。为了进行理论研究，控制工程不着重讨论各个具体的控制系统。尽管控制系统的构造以及它控制的物理量、种类很多（机械的、电气的、液压的、热工的……），但在控制时所发生的动的状态，可以用彼此间很相似的微分方程式（称为系统的动态数学模型）来描

述。控制工程注意到这个各种物质运动的统一性，把控制系统抽象为数学模型，研究各种控制系统中所共同具有的那些原理（不依系统的物理性质为转移），研究统一的分析与综合的计算方法。

分析或综合（设计）具体的控制系统时，则首先要建立这个系统或其已知部分的数学模型，之后即可用统一的计算方法进行。

三、广泛适用意义

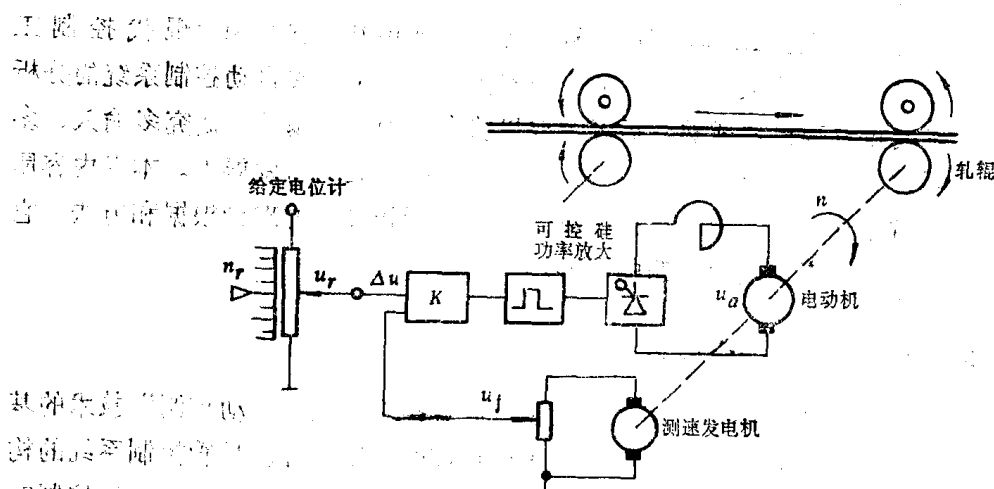
控制工程的关于数学模型、工程分析计算方法和一般规律等内容具有广泛适用意义。不仅是掌握和研究自动控制系统的基础，而且日益成为分析各种动态系统特性的有效方法。

以机械工程科学领域来说，早期所涉及的问题主要是纯几何的、静力学的或者是达到平衡状态的稳定运动。随着工业生产以及科学技术的不断发展，机械工程科学面临着许多高温、高速、高压、高精度的复杂问题，这就涉及各种系统或过程的动态过程、动态特性（或动力学特性）而显示出机械工程科学与控制工程科学所研究的问题的相似性。因而可以采用控制工程科学的许多观点方法进行分析和解决。例如，机械振动、机械的动态特性、机构精度等等，应用控制工程的观点和方法有可能揭示出更深刻的本质，并指出改进或控制它们性能的更有效的途径和方法。

习 题

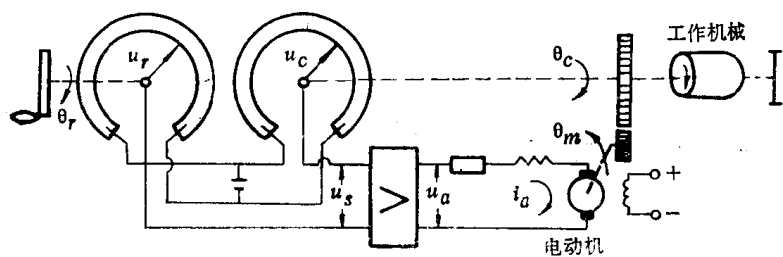
1-1 试举几个日常生活中的开环控制和闭环控制系统，画出它们的框图，并说明它们的工作原理。

1-2 带钢连轧机架轧辊的转速控制系统如图所示，画出系统的功能方块图，并说明系统的控制原理。



习题 1-2 图 轧辊转速控制系统

1—3 位置随动系统如图所示。试画出系统的功能方块图，并说明系统的控制原理。



习题 1—3 图 位置随动系统

1—4 什么是负反馈控制原理？在习题 1—2 和习题 1—3 中，怎样实现负反馈控制？在什么情况下反馈极性会误接为正？对系统工作有何影响？