

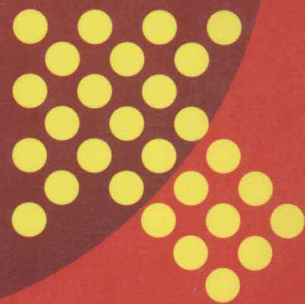
21世纪高等学校规划教材



ZIDONG KONGZHI LILUN

自动控制理论

王立红 张 允 主编



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>

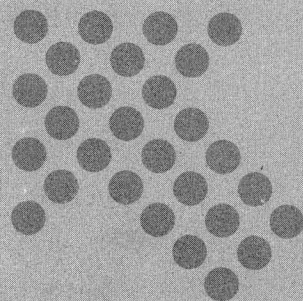
21世纪高等学校规划教材



ZIDONG KONGZHI LILUN

自动控制理论

主 编 王立红 张 允
编 写 梁春晖 李琳娜
主 审 王万良



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

前 言

自动控制理论是研究自动控制共同规律的技术基础科学,在工程、军事以及社会经济的各个领域有着广泛的应用。它的早期是以反馈理论为基础的自动调节原理;由于在军事和航空中的成功应用,第二次世界大战后形成了完整的经典控制理论体系。20 世纪 60 年代,随着现代应用数学和计算机技术的发展,以及科技和经济的发展,逐渐形成了现代控制理论体系;目前,自动控制理论已进入大系统理论和智能控制理论的新阶段。这就使得“自动控制理论”课程具有理论概念强、工程背景深厚、强调方法论教育的特点。

本书是编者结合自己多年从事自动控制理论教学的经验,参阅并吸取了大量国内外优秀教材,根据学校教学改革的需要,同时为了满足研究生入学考试的需要编写而成。

本书共分 10 章。第 1 章绪论主要介绍了自动控制系统的基本原理和结构,自动控制系统的分类,以及对自动控制系统的要求等。使学生对有关自动控制的概念有一定的了解,为后面内容的学习奠定基础。第 2 章介绍了控制系统的数学模型,首先根据电路原理建立微分方程,再转化成传递函数,对于复杂系统,采用结构图化简和梅森公式求传递函数。最后利用 Matlab 仿真软件建立控制系统的数学模型。第 3 章和第 8 章采用状态空间法,首先建立系统的状态空间模型,然后对系统的状态空间进行分析和设计。第 4、5、6 章介绍了线性定常连续系统的分析方法,即时域法、根轨迹法和频域法。第 7 章介绍了线性系统的校正方法,包括串联校正、反馈校正和复合校正。第 9 章介绍了离散系统的基本理论,数学模型,性能分析和最少拍系统的设计等。第 10 章介绍了非线性系统的两种分析方法,相平面法和描述函数法。全书内容精炼,理论阐述深入浅出,突出物理概念,结合工程实践,便于应用。

本书由辽宁工业大学王立红和长春工程学院张允主编。其中,第 1、2、4、6、9 章由长春工程学院张允编写,第 3 章和第 8 章由辽宁工业大学王立红编写,第 5 章由长春工程学院李琳娜编写,第 7 章和第 10 章由长春工程学院梁春晖编写。本书由浙江工业大学王万良教授审阅,提出了诸多宝贵意见,在此表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,编写时间仓促,书中难免存在错误和不当之处,恳请广大读者给予批评指正。

编 者

2010 年 1 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 自动控制系统的基本原理与结构	1
1.3 自动控制系统的分类	7
1.4 对自动控制系统的基本要求	9
1.5 自动控制系统举例	10
习题	14
第 2 章 控制系统的数学模型	17
2.1 引言	17
2.2 系统微分方程的建立	17
2.3 传递函数	23
2.4 系统的结构图和传递函数	32
2.5 信号流图及梅逊公式	42
2.6 非线性数学模型的线性化	48
2.7 控制系统数学模型的建立与转换方法	49
习题	56
第 3 章 控制系统的状态空间模型	60
3.1 状态与状态空间	60
3.2 状态方程与输出方程	61
3.3 状态空间模型与输入—输出模型之间的关系	63
3.4 利用状态空间模型求解线性定常系统	70
3.5 利用 Matlab 分析状态空间模型	74
习题	78
第 4 章 线性系统的时域分析	80
4.1 典型输入信号和时域性能指标	80
4.2 一阶系统的时域响应分析	83
4.3 二阶系统的时域响应分析	86
4.4 高阶系统的时域分析	98
4.5 控制系统的稳定性分析	99
4.6 控制系统的稳态误差	105
4.7 利用 Matlab 进行时域分析	112
习题	119

第 5 章 根轨迹法	123
5.1 根轨迹的基本概念	123
5.2 绘制根轨迹的基本法则	125
5.3 广义根轨迹	133
5.4 按根轨迹分析控制系统	139
5.5 利用 Matlab 进行根轨迹分析	143
习题	148
第 6 章 线性系统的频域分析法	151
6.1 频率特性	151
6.2 典型环节的频率特性	154
6.3 最小相位系统与非最小相位系统	162
6.4 开环频率特性曲线的绘制	164
6.5 频率稳定判据	168
6.6 相对稳定性分析	175
6.7 频率特性与控制系统性能的关系	177
6.8 利用 Matlab 绘制频域响应图及分析频域稳定性	180
习题	189
第 7 章 控制系统的校正	192
7.1 系统的设计与校正问题	192
7.2 基本控制规律简介	194
7.3 常用校正装置及其特性	197
7.4 串联校正	204
7.5 反馈校正	215
7.6 复合校正	220
7.7 利用 Matlab 进行系统设计	223
习题	230
第 8 章 线性控制系统的状态空间分析与设计	234
8.1 状态方程的标准形	234
8.2 线性定常连续系统的能控性	238
8.3 线性定常连续系统的能观测性	241
8.4 控制系统的结构分解	244
8.5 能控标准形和能观测标准形	249
8.6 状态反馈与输出反馈	252
8.7 闭环系统的极点配置	254
8.8 状态观测器设计	257
8.9 带有状态观测器的状态反馈系统	261
8.10 李亚普诺夫稳定性分析	263
8.11 利用 Matlab 进行状态空间分析与设计	266
习题	273

第 9 章 离散控制系统	277
9.1 引言	277
9.2 信号的采样与保持	278
9.3 z 变换与 z 反变换	284
9.4 离散系统的数学模型	294
9.5 离散系统的性能分析	303
9.6 最少拍采样控制系统的设计	313
习题	318
第 10 章 非线性控制系统	320
10.1 典型非线性特性	320
10.2 描述函数法	323
10.3 用描述函数分析非线性控制系统	330
10.4 相平面法	333
10.5 非线性系统的相平面分析	342
10.6 利用 Matlab 进行非线性系统分析	347
习题	350
参考文献	354

第 1 章 绪 论

1.1 引 言

科学技术的发展对于改变社会的生产面貌、推动人类文明的进程具有极其重要的意义。在此过程中,自动控制技术始终扮演着重要的角色。例如,在日常生活中,从汽车、空调器、微波炉、洗衣机的自动控制到城市交通、通信网络的控制;在工业生产过程中,从温湿度、压力、流量、频率、物位的控制到机器人生产线的控制;在尖端控制领域中,从航空航天领域的宇宙飞船姿态控制到国防工业中的导弹制导系统,自动控制技术的应用几乎无处不在。此外,在人口控制、成本控制、社会经济控制等社会学领域,自动控制理论也被越来越广泛地应用。

本书要讨论的自动控制理论,是自动控制技术的基础理论,是研究自动控制共同规律的技术科学。它是采用数学的方法对自动控制系统进行分析与综合的一般理论。所谓分析是指在给出系统数学模型的基础上确定系统的性能。所谓综合是指在对系统性能提出要求的基础上,确定一个满足要求的系统模型。目前,自动控制理论已不仅仅是数学研究人员关心的课题,由于其对工程实践的指导作用,已成为工程技术人员和科学工作者的必修课。在科学技术高度发达的今天,控制工程师已更多、更广泛地将控制理论与控制技术结合起来,在各个专业工程领域中,将人类的许多梦想变成了现实。所以自动控制理论及其实际应用已成为一个极具价值的热门工程学科领域,有着无可限量的发展前途。

根据不同的发展阶段,自动控制理论内容主要包括经典控制理论和现代控制理论两大部分。经典控制理论主要是指控制理论从其发展初期到 20 世纪 50 年代末所形成的理论,它以传递函数为工具和基础,以频域法和根轨迹法为核心,研究单变量控制系统的分析和设计问题。几十年来,经典控制理论解决了大量的工程实际问题,取得了非常广泛的应用。20 世纪 50 年代末至 60 年代初,在航空航天技术的推动下,现代控制理论应运而生,它以状态空间法为标志和基础,以矩阵论和近代数学方法作为工具,研究多变量、变参数、非线性、高精度等各种复杂系统的分析与设计问题。近年来,由于计算机和现代应用数学研究的迅速发展,使现代控制理论又在大系统工程、人工智能控制等方面继续向纵深发展。纵观一个多世纪以来自动控制科学与技术的发展,我们发现,经典控制理论与现代控制理论并不是相互独立的,而是相互依存、互为补充的,因此,只有将经典控制理论与现代控制理论有机地结合起来,使其浑然一体,才更有利于理解控制理论的真谛。

1.2 自动控制系统的基本原理与结构

所谓自动控制是指在没有人直接参与的情况下,利用外加的设备或装置(称为控制器),使机器、设备或生产过程(称为被控对象)的某个工作状态或参数(即被控量)自动地按照预定的规律运行。例如,金属切削机床的速度在电网电压或负载变化时,能自动保持近似地不变;机器人按照预定的程序进行工作;由雷达和计算机组成的导弹发射和制导系统,自动

地追击敌方目标；宇宙飞船能准确地月球着陆，并进行成功回收等。这一切都是自动控制技术高速发展的结果。

自动控制系统是为实现某一控制目标，将被控对象和控制装置按照一定的方式连接起来组成的一个有机总体。在自动控制系统中，被控对象的输出量即被控量是要求严格加以控制的物理量，它可以要求保持为某一恒定的值，例如速度、位置、温度、压力等，也可以要求按照某个给定规律去运行，例如飞行轨迹、数控机床的运动规律等；而控制装置则是对被控对象施加控制作用的机构的总体，它可以采用不同的原理和方式对被控对象进行控制。

自动控制系统的性能在很大程度上取决于系统中的控制器为了产生控制作用而必须接收的信息。这个信息有两个可能的来源，一是来自系统外部，即由输入端输入的参考输入信号，另一个来源是来自被控对象的输出端，即反映被控对象的行为或状态信息的输出信号。把从被控对象输出端获得的信息，通过反馈环节再送回到控制器的输入端，称为反馈。传送反馈信息的载体称为反馈信号。是否采用反馈，对控制系统的性能影响极大，因而，控制系统的基本结构相应地按照有无反馈分为两大类，即开环控制系统和闭环控制系统。

1.2.1 开环控制

开环控制是指控制装置与被控对象之间只有顺向作用而没有反向联系的控制过程，按这种方式组成的系统称为开环控制系统。开环控制系统可以按给定量控制方式组成，也可以按

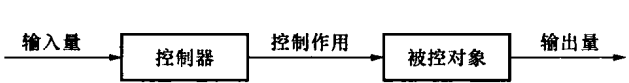


图 1 - 1 开环控制系统框图

扰动控制方式组成。图 1 - 1 为按给定量控制方式组成的开环控制系统框图。由图可见，这种控制方式的特点是控制作用直接由系统的输入量产生。

给定一个输入量就有一个输出量与之对应，且系统的输出量对系统的控制作用没有影响。控制精度完全取决于信息传递过程中所用元件性能的优劣及校准的精度。由于开环控制结构简单、调整方便、成本低，在国民经济各部门均有采用。例如，采用集中供热方式的室内供热系统，供热锅炉按预定的时间向暖气管道中送去规定温度的热水以实现供热，而不监测各房间的温度；以及自动洗衣机、自动售货机、产品自动生产线、交通指挥红绿灯转换等。

图 1 - 2 为一个直流电动机转速开环控制系统的原理示意图，图 1 - 3 为其系统框图。图中

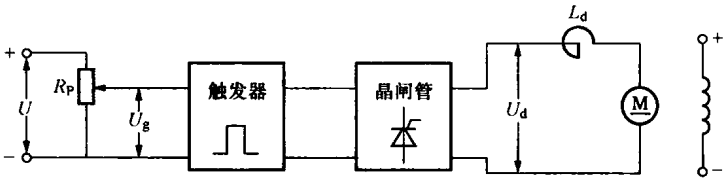


图 1 - 2 直流电动机转速开环控制系统

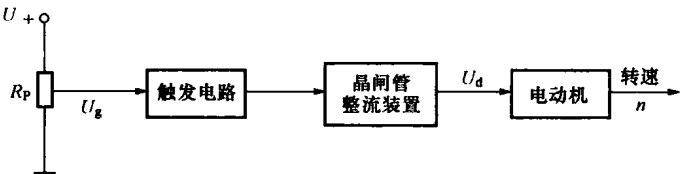


图 1 - 3 直流电动机转速开环控制框图

电动机是电枢控制的直流电动机，用它来带动一个需要以恒速转动的负载，其电枢电压由晶闸管整流装置提供。当调节电位器 R_p 的滑臂位置时，输入电压 U_g 随之改变，晶闸管整流装置的触发电路便产生一串与电压 U_g 相对应的、具有一定相位的触发脉冲去控制晶闸管的导通角，从而改变晶闸管放大器的输出电压 U_d 。随着电枢电压 U_d 的变化，电动机便以不同的转速带动负载运转。对于本系统，用以控制电动机 M 转速的给定电压 U_g 为系统的控制量或输入量，电动机就是被控对象，而负载的转速 n 被称为系统的输出量或被控制量。

在图 1-2 所示的开环控制系统中，若要求电动机 M 拖动负载以恒定转速转动，仅调节给定电压 U_g 是不够的，这是因为在电动机运行的过程中，有许多因素会使电动机的转速发生变化，例如负载大小发生变化、电源电压波动、系统中各元件参数的变化等，都会使电动机转速 n 偏离给定电压 U_g 所对应的转速期望值。通常将这些因素称为扰动量。由于上述控制系统只是根据给定的输入量进行控制，而输出量在整个控制过程中对系统不产生任何影响，因此当系统受到干扰作用后，输出量一旦较预期值出现偏差，系统就没有消除或减小误差的功能，即没有自动修正的能力，这是开环系统的一个“致命缺点”。由于开环系统的抗干扰能力差，因此它的使用有一定的局限性。

为了克服开环控制的缺点，提高控制精度，在一些扰动可以预知或可以测量的场合，可根据测得扰动量的大小对控制作用进行相应的修正或补偿，这样可以提高系统的控制精度，如图 1-4 所示。这种按开环补偿原则建立起来的系统称为开环补偿系统，这种控制方式又称为前馈控制。

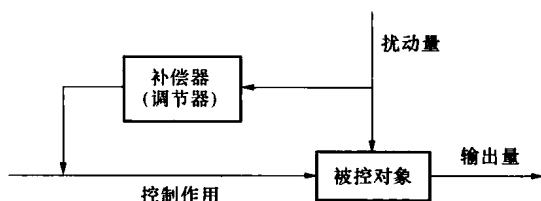


图 1-4 开环扰动补偿系统框图

图 1-5 为按扰动控制直流电动机转速框图，图中把负载变化视为外部扰动输入，负载变化对输出转速产生的影响以及相应的控制补偿作用分别沿箭头的方向从输入端传送到输出端，作用的路径也是单向的、不闭合的。对照前一种按给定控制的路径，它们是相互平行的。因此按给定控制和按扰动控制原则建立起来的系统，都属于开环控制。它们的基本特征是：作用信号是单方向传递的，形成开环。

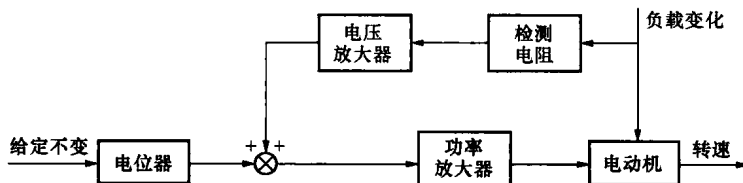


图 1-5 按扰动控制直流电动机转速框图

1.2.2 闭环控制

闭环控制是指控制装置与被控对象之间既有顺向作用，又有反向联系的控制过程。图 1-6 所示的系统就是一个闭环控制系统。这种控制系统由于存在输出对输入的反馈，因此对系统的输出形成了一个闭合的回路，故称为闭环控制系统，又称反馈控制系统。闭环控制系

统是由各种结构不同的元部件组成的，从完成“自动控制”这一功能来看任一系统均应包括控制器与被控对象两大部分，其中控制器是由具有一定功能的各种基本控制元件组成的，根据各控制元件在系统中的功能和作用，可将控制元件分成四大类。

一、执行元件

执行元件的功能是直接推动被控对象，使其被控量发生变化。用来作为执行元件的有机电控制系统中的各种电动机，液位控制系统中的液压马达，温度控制系统中的加热器等。执行元件有时也被归入被控对象中。

二、放大元件

放大元件的功能是将微弱的信号放大，使信号具有足够大的幅值或功率，进而推动执行元件去控制被控对象。放大元件又分为前置放大器和功率放大器两类。前置放大器能放大一个信号的数值，但功率并不大，它靠近系统的输入端。如由运算放大器构成的前置放大器只能放大电压信号，而能输出的电流却很小。功率放大器输出的功率大，它输出的信号可直接带动执行元件运转和动作。例如，用功率晶体管组成的功率放大器同时输出足够大的电压和电流，能直接带动直流电动机运转。

三、测量元件

测量元件的功能是将一种物理量检测出来，并且按照某种规律转换成容易处理和使用的另一种物理量输出。测量元件一般称为传感器。过程控制中的变送器、敏感元件都属于测量元件。

四、校正元件

由上述三大类元件与控制对象组成的系统往往不能满足技术要求。为了保证系统能正常工作（稳定）并改善系统的性能，控制系统中还要另外补充一些结构或参数便于调整的元件，这些元件统称为校正元件，又称为补偿元件。常用的校正元件是由电阻、电容组成的无源或有源网络、电子计算机、部分测量元件（如测速发电机等）。

从图 1-6 所示闭环控制系统组成框图可以看出，控制系统中还包含给定元件和比较元件。给定元件的功能是给出与期望的被控量相对应的系统输入量（即参考输入）。例如图 1-2 中给出电压 u_g 的电位器。比较元件的功能是把测量元件检测的被控量实际值与给定元件给出的参考输入进行比较，求出它们之间的偏差。比较元件一般不是一个单独的实际元件，差动放大器、机械差动装置、电桥电路等均具有比较元件的功能。

闭环控制实质上是一个按偏差进行控制的过程，即系统的输出经测量元件检测后又返回

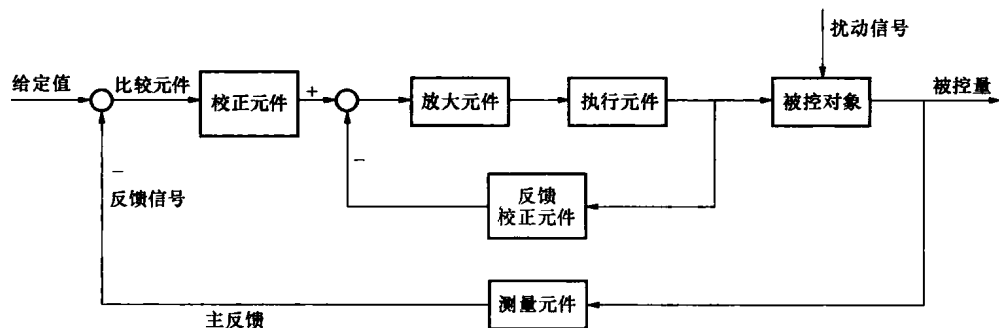


图 1-6 闭环控制系统组成框图

到系统的输入端与给定值进行比较而形成偏差，而控制器则根据偏差信号的符号和大小，产生相应的控制作用去消除偏差使被控量（系统输出）等于给定值。系统输出返回到输入端的信号称为反馈信号。如果反馈信号与系统输入信号相反，则称为负反馈；反之，如极性相同，则称为正反馈。信号从输入端沿箭头方向到达输出端的传输通路称前向通路；系统输出量经测量元件反馈到输入端的传输通路称为主反馈通路。前向通路与主反馈通路共同构成主回路。此外，还有局部反馈通路以及由它构成的内回路。只包含一个主反馈通路的系统称为单回路系统；有两个或两个以上反馈通路的系统称为多回路系统。

在图 1-2 所示开环直流调速系统的基础上，增加一个由测速发电机构成的反馈回路，便得到了与之相应的闭环调速系统，如图 1-7 所示。在此系统中，TG 为测速发电机，用来检测电动机 M 输出的转速 n ，并给出与电动机转速成正比的反馈电压 U_f 。将代表实际输出转速的反馈电压 U_f 与代表希望输出转速的给定电压 U_g 进行比较，得到偏差信号 ΔU ，偏差信号经功率放大器放大以后驱动执行元件去控制电动机的转速，使其能完全按照参考输入的要求去变化。在整个控制过程中，只要电动机转速在扰动作用下偏离了它的期望值，即 $\Delta U \neq 0$ ，系统就能通过闭环控制的作用，自动地消除或削弱扰动信号对被控量的影响，以减小偏差，提高控制精度。

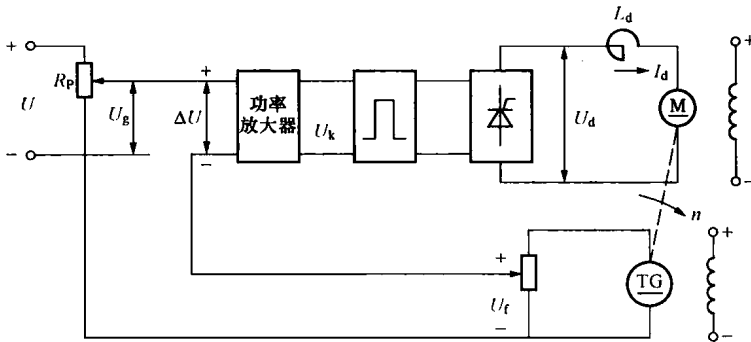


图 1-7 直流电动机转速闭环调速系统

用框图直观地把上述控制过程描述出来，更方便进行性能分析，如图 1-8 所示。图中，用“○”代表多路信号汇合点，“+”表示信号相加，“-”表示信号相减。由框图分析电动机转速自动调节的过程如下：当系统受到扰动影响，例如电动机的负载转矩 T_L 突然增大时流经电动机电枢中的电流便相应地增大，电枢电阻上的压降也变大，从而导致电动机转速的降低，测速发电机的输出电压 U_f 减小。误差电压 ΔU 便相应地增大，经放大器放大后，使触发脉冲前移，晶闸管整流装置的输出电压 U_d 增大，转速上升，从而补偿了由于负载转矩

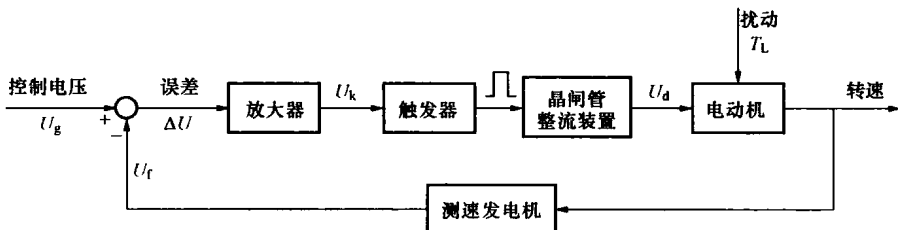


图 1-8 直流电动机转速闭环控制系统框图

T_L 的增大而造成的电动机转速的下降,使电动机的转速近似地保持不变。

1.2.3 开环控制与闭环控制的比较

一般来说,开环控制结构简单、成本低廉、工作稳定,因此当系统的输入信号及扰动作用预先知道时,采用开环控制即可取得较为满意的效果。但由于不存在输出量的反馈,因此对干扰造成的误差无自动修正能力。

闭环控制系统中由于引入了反馈,因此使系统的输出量对外部和内部的干扰均不甚敏感,这样对于给定的控制对象有可能采用不太精密且成本较低的元件就能构成精密的控制系统。但是,当系统输出量出现偏离后,经过反馈形成一个修正偏离的控制作用,由于在这个控制作用和它所产生的修正偏离的效果之间一般是有时间延迟的,此时输出的偏离不能得到立即修正,从而有可能使输出量处于振荡状态。如果系统参数选择不当,不仅不能修正偏离,反而会使偏离越来越大系统无法正常工作。因此,对于闭环系统来说稳定性始终是一个重要问题。

应当指出,当系统的输入量能预先知道并且不存在其他扰动时采用开环控制比较合适,只有当存在无法预计的扰动和系统中元件的参数存在着无法预计的变化时,闭环控制系统才具有优越性。将开环控制和闭环控制适当地结合在一起,通常比较经济,并且能够获得满意的综合系统性能。

1.2.4 复合控制

将开环和闭环控制结合在一起构成开环—闭环控制方式,称为复合控制。复合控制实质上是在闭环控制回路的基础上附加一个输入信号或扰动信号的前馈通路,对该信号实行加强或补偿以提高系统的控制精度。前馈通路通常由对输入信号的补偿装置或对扰动作用的补偿装置组成,分别称为按输入信号补偿和按扰动作用补偿的复合控制系统,如图 1-9、图 1-10 所示。

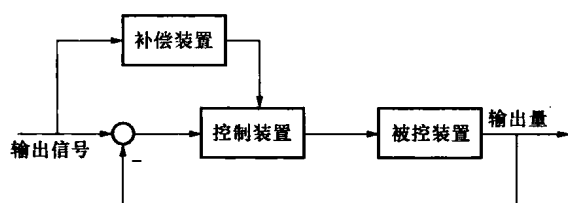


图 1-9 按输入信号补偿的复合控制系统框图

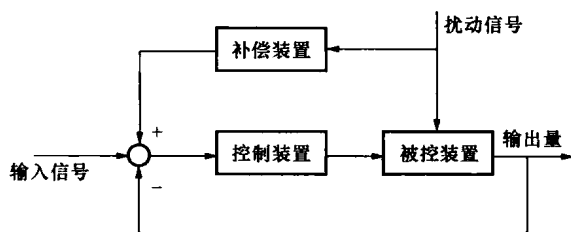


图 1-10 按扰动信号补偿的复合控制系统框图

按输入信号补偿的复合控制是一种对控制能力的加强作用。通常,补偿装置可提供一个输入信号的微分作用,并作为前馈控制信号,与原输入信号一起对被控对象进行控制,以提高系统的跟踪精度。按扰动作用补偿的补偿装置,能够在可测扰动对系统的不利影响产生前,提供一个控制作用,以抵消扰动对系统输出的影响。补偿装置按照不变性原理设计,即在任何输入下,均保证系统输出与作用在系统上的扰动完全无关或部分无关,从而使系统输出完全复现输入。

复合控制中的前馈通路相当于开环控制,因此对补偿装置的参数稳定性要求较高,否则,会由于补偿装置参数本身的漂移而减弱其补偿效果。前馈通路的引入,对闭环回路性能影响不大,特别是对稳定性无影响,但能大大提高系统控制精度,因此获得了广泛应用。

1.3 自动控制系统的分类

自动控制系统可根据需要和使用方便等方面从各个不同的角度进行分类。例如,按给定信号的变化规律分为恒值、随动与程序控制系统;按描述系统的数学方程式的不同,分为线性系统与非线性系统;按照系统内部传输信号的性质,分为连续控制系统和离散控制系统;按照系统是否含有参数随时间变化的元件,分为定常系统和时变系统;按系统输入输出信号的数量,分为单变量系统和多变量系统。此外,也可以按照组成系统的元件的种类来划分,如机电控制系统、液压控制系统和气动控制系统等。若按被控量的名称来分类,有温度或湿度控制系统、压力控制系统、转速控制系统等。这里只介绍几种常用的控制方法,使在分析和设计系统之前,对它们的特征有一个初步的认识。

1.3.1 恒值调节系统、随动系统与程序控制系统

恒值调节系统的输入信号为常量,这种系统的任务是在存在扰动的情况下,通过自动地调节,使被控量保持在一个恒定的、期望的数值上。前面提到的直流电动机调速系统,以及其他恒定压力、恒定流量、恒定温度等多数过程控制系统都属于这一类系统。

随动系统的输入信号是一个随时间任意变化的函数,其变化规律无法预测。这类系统的任务是在存在扰动的情况下,保证被控量快速、准确地随给定值的变化而变化。在随动系统中,被控量通常是机械位移、速度或加速度等。随动系统也称为跟踪系统或伺服系统。用于军事上的雷达高射炮的角度控制系统,用于航天、航海中的自动导航系统,工业自动化仪表中的各种变送器、显示记录仪等都属于随动系统的例子。

程序控制系统的输入信号是按预定规律随时间变化的函数,要求输出量迅速、准确地跟踪输入量。程序控制系统和随动系统的相同点是它们的输入量都是时间的函数,不同之处在于前者的输入量是已知的时间函数,而后的输入量是未知的、随机的、任意的时间函数。在工业生产中广泛应用的程序控制有机床数控加工系统、加热炉温度自动变化控制系统等。实际上,程序控制系统是随动系统的一种特殊情况,其分析研究方法也和随动系统相同,而恒值控制系统也可视为程序控制系统的特例。

1.3.2 线性与非线性控制系统

若组成系统的元件都具有线性特性,其输入、输出关系都能用线性微分方程描述,则称这种系统为线性控制系统。线性系统的特点是具有叠加性和齐次性,在系统存在几个输入时,系统的输出等于各个输入分别作用于系统时系统输出之和,当系统输入增大或减小时,系统的输出也按比例增大或减小。线性系统的响应与初始状态无关。

线性系统可以细分为线性定常系统和线性时变系统两大类。如果描述系统运动状态的微分(或差分)方程的系数为常数而不随时间变化,则这种线性系统称为线性定常(或时不变)系统。这类系统的明显特征是,系统的响应曲线形状,只取决于具体的输入,而与输入的时间起点无关。也就是说无论什么时刻开始输入,只要输入信号一致,响应就是相同的,这称为定常特性。如果微分(或差分)方程的系数是时间的函数,则这种线性系统称为线性时变系统。时变系统中含有时变元件,例如,航天卫星是一个时变对象,在飞行的各阶段,由于燃料的不断减少其质量随时间而变化。时变系统的分析比定常系统要复杂。

本书着重介绍定常系统的控制理论。这一方面是因为目前定常系统的控制理论较时变系

统控制理论成熟很多；另一方面，虽然严格地说实际系统都具有时变的特性，但对大多数工业系统来说，其参数随时间变化并不明显，通常可以作为定常系统来处理。

组成系统的元件中，只要有一个元件具有非线性特性，这类系统就称为非线性控制系统。这时，系统的输入、输出关系要用非线性微分方程描述。非线性系统一般不具有齐次性，也不适用叠加原理，而且它的输出响应和稳态值与其初始状态有很大的关系。

严格地讲，绝对的线性控制系统（或元件）是不存在的，因为所有的物理系统和元件在不同程度上都具有非线性特性，例如，系统中应用的放大器的饱和特性，运动部件的间隙、摩擦和死区，弹性元件的非线性关系等。为了简化对系统的分析和设计，在一定的条件下，可以对某些非线性特性作线性化处理。这样，非线性系统就近似为线性系统，从而可以用分析线性系统的理论和方法对其进行研究。

1.3.3 连续与离散控制系统

控制系统中各部分的信号若都是时间 t 的连续函数，则称这类系统为连续控制系统。连续系统的运动状态是用微分方程来描述的。连续系统中各元件传输的信息在工程上称为模拟量，多数实际物理系统都属于这一类。例如，模拟式的工业自动化仪表以及用模拟式仪表来实现自动化的过程控制系统都属于连续系统。

控制系统中各部分的信号中只要有一个是时间 t 的离散函数，即为脉冲序列或数码的形式，则称这类系统为离散控制系统。对离散系统常采用差分方程建立数学模型。图 1-11 所示的计算机控制系统就是一种常见的离散控制系统。在此系统中，炉温本是时间的连续变量，但经 A/D 转换后，变成数码进入计算机，由于 A/D 转换含有一个采样开关，所以计算机得到的炉温信号是一个在时间上离散的变量。

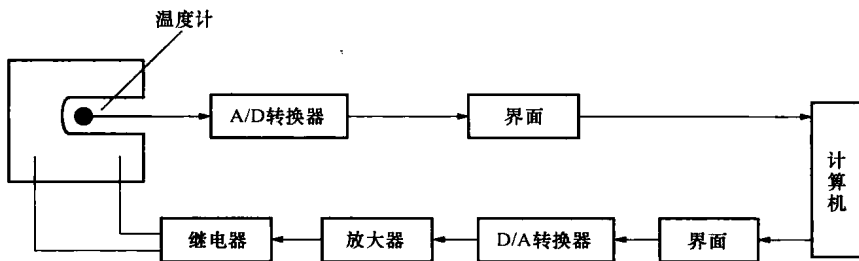


图 1-11 炉温的计算机控制系统

1.3.4 单变量与多变量控制系统

在一个控制系统中，如果只有一个输入量和一个输出量，则这类系统称为单变量控制系统或单输入单输出系统。所谓单变量是从系统外部变量的描述来分类的，而不考虑系统内部

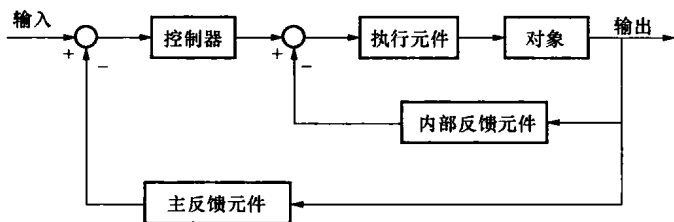


图 1-12 单变量多回路系统

的通路与结构。系统内部的结构可以是单回路的也可以是多回路的，内部变量形式也多种多样，如图 1-12 所示。内部变量可称为中间变量，输入与输出变量称为外部变量。对系统性能的分析只研究外部变量之间的关系。

单变量系统是经典控制理论的主要研究对象，它以传递函数作为基本数学工具，讨论线性定常系统的分析和设计问题，也是本课程讲述的主要内容。

在一个控制系统中，如果有多个输入量和多个输出量，且各控制回路相互之间有耦合关系，则称这种系统为多变量控制系统或多输入多输出控制系统，如图 1-13 所示。

多变量系统是现代控制理论研究的主要对象。在数学上以状态空间法为基础，讨论多变量、变参数、非线性、高精度、高效能等控制系统的分析和设计。应当指出，在过程控制中，很多工艺设备或单元操作的被控量间都互相关联，所组成的控制回路之间亦有耦合关系，只是有时这种关联成耦合关系十分微弱，因而可近似视为无耦合关系，从而看成为互不关联的一些单变量系统，应用经典控制理论的方法来分析和研究。

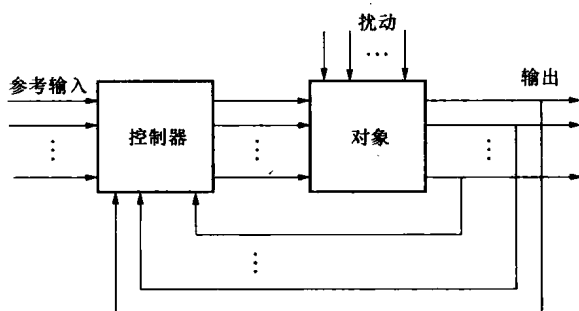


图 1-13 多变量控制系统

1.4 对自动控制系统的基本要求

对自动控制系统的基本要求可归纳为三个方面，即稳定性、准确性和快速性。

一、稳定性

稳定性是对控制系统最基本的要求，是保证控制系统正常工作的先决条件。一个稳定的控制系统，其被控量偏离期望值的初始偏差应随时间的增长逐渐减小或趋于零。具体地说，对于稳定的恒值控制系统，被控量因扰动而偏离期望值后，经过一个过渡过程时间，被控量应恢复到原来的期望值状态；对于稳定的随动系统，被控量应能始终跟踪输入量的变化。

线性自动控制系统的稳定性是由系统结构决定的，与外界因素无关。这是因为控制系统中一般含有储能元件或惯性元件，这就意味着控制信号不可能使系统输出在瞬间达到期望值。如图 1-14 所示，在电炉温度控制系统中，当热电偶测得实际炉温低于期望温度时，测得电压 U 小于给定电压 U_0 ，二者比较的偏差电压 $\Delta U > 0$ ，电动机正转，带动调压器的滑动触头上移，使电阻丝的供电电压增加，电流加大，炉温上升，直至炉温升至并保持在希望值为止。可是由于炉温的升高是一个有惯性的过程，当测得炉温达到期望值时，尽管系统可以瞬间改变控制信号，减小电炉两端的供电电压，但炉温还是会再持续升高一会儿。同样，当炉温从高到低降到期望值时，控制信号的瞬间切换也不能阻止炉温的继续降低。这样往复循环就产生了振荡。如果这个振荡过程是逐渐减弱的，系统最后可以达到平衡状态，控制目的

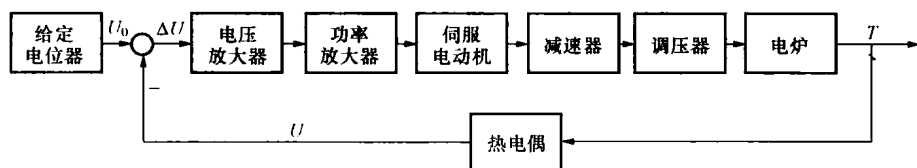


图 1-14 电炉温度控制系统框图

得以实现,则称为稳定系统;反之,如果振荡过程逐步增强,系统被控量将失控,则称为不稳定系统。一个好的控制系统应该能消除振荡,使系统保持平稳地工作,反之,一个设计不好的反馈控制可能会引起系统的振荡,甚至造成系统的彻底损坏。

二、准确性

准确性就是要求被控变量与设定值之间的误差达到所要求的精度范围,且被控变量在任何时刻、任何情况下都不能超出所规定的误差范围。控制的准确性总是用稳态精度来度量,稳态精度属于系统的稳态性能,通常用稳态误差来表示稳态精度。在参考输入信号作用下当系统达到稳态后,其稳态输出与参考输入所要求的期望输出之差称为给定稳态误差。显然,这种误差越小,表示系统的输出跟随参考输入的精度越高。系统在扰动信号作用下,其输出必然偏离原平衡状态。由于系统自动调节的作用,其输出量会逐渐向原平衡状态方向恢复。当达到稳态后,系统的输出量若不能恢复到原平衡状态时的稳态值,所产生的差值称为扰动稳态误差。这种误差越小表示系统抗扰动的能力越强,其稳态精度也越高。

三、快速性与平稳性

为了很好地完成控制任务,控制系统仅仅满足稳定性要求是不够的,还必须对其过渡过程的形式和快慢提出要求,一般称为动态性能。动态性能包括过渡过程的长短、过渡过程中系统是否振荡、系统的输出在达到期望值之前是否有超调(即输出值超出期望值)、超调量的大小如何等。一个好的控制系统应该具有过渡过程短、振荡和超调小的特点,即同时满足“快速性”和“平稳性”的要求。

1.5 自动控制系统举例

一、开环控制系统举例

【例 1-1】 图 1-15 是一个自动调压系统,其原理框图如图 1-16 所示。

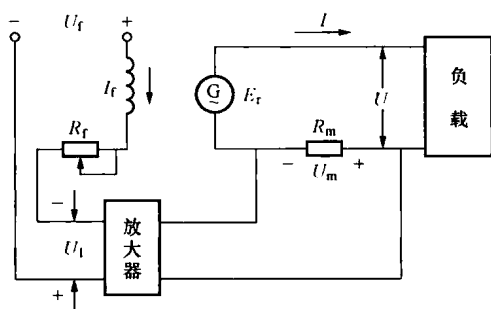


图 1-15 自动调压系统

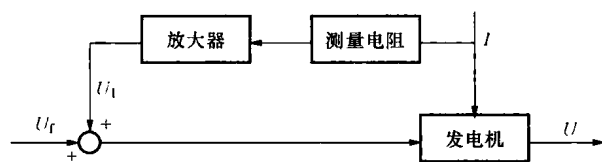


图 1-16 自动调压系统框图

1. 各组成元件功能分析

被控对象：发电机电势 E_r 。

控制装置：测量元件——测量电阻 R_m ，放大元件——放大器。

被控量：电枢端电压 U 。

给定量：励磁电压 U_f 。

扰动量：负载电流 I 。

2. 工作原理分析

这是一个前馈控制系统。当负载电流 I 变化时，发电机的电枢绕组压降也随之改变，造成输出端电压 U 不能保持恒定。因此，负载电流变化对稳压控制来说是一种扰动。采用补偿措施，将电流 I 在电阻 R_m 上的压降 U_m 检测出来，然后将 U_m 通过适当的放大串联到励磁回路中。当负载电流突然增大时，端电压 U 会减小，但由于在励磁回路中 U_m 的增大并且放大后电压 U_1 也随之增大，进而励磁电流 I_f 增大，所以发电机电动势 E_r 增大，从而使 U 回升，以补偿电枢电压的改变，达到维持电压 U 恒定的目的。

二、闭环控制系统举例

【例 1-2】 图 1-17 是一个控制导弹发射架方位的角位置随动系统原理图。图中，电位器 P1、P2 并联后跨接到同一电源 E_0 的两端，其滑臂分别与输入轴和输出轴相连接，以组成方位角的给定装置和反馈装置。输入轴由手轮操纵，输出轴则由电动机经减速器后带动，电动机采用电枢控制方式工作。其原理框图如图 1-18 所示。

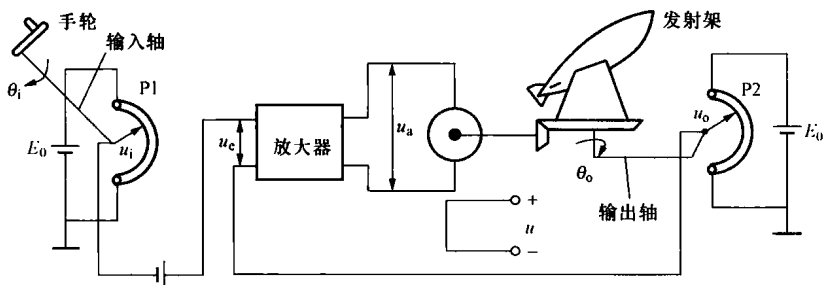


图 1-17 角位置随动系统的原理图

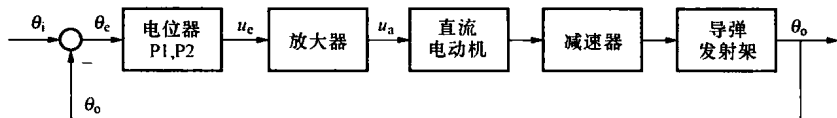


图 1-18 角位置随动系统的框图

1. 各组成元件功能分析

被控对象：导弹发射架。

控制装置：给定元件——发送电位器，测量与比较元件——电桥，执行元件——电动机与减速器。

被控量：导弹发射架的角位移。

给定量：手轮的角位移。

2. 工作原理分析

这是一个闭环控制系统。该系统是用一对电位器 P1、P2 作为位置的检测元件，它们分别把系统的输入与输出的位置信号转换成与之成比例的电压信号，并进行比较。当发送电位器 P1 与接收电位器 P2 的转角相等，即导弹发射架的方位角与输入轴方位角一致 $\theta_o = \theta_i$ 时， $u_e = u_i - u_o = u_a = 0$ ，此时，两环形电位器组成的桥式电路处于平衡状态，无电压输出，表示此时跟踪无偏差，电动机不动，系统处于静止状态。

当摇动手轮使电位器 P1 的滑臂转过一个输入角 θ_i 的瞬间，由于输出轴的转角 $\theta_o \neq \theta_i$ ，