



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

自动控制原理

华北水利水电学院 孙美凤 王玲花 主编

Higher Education



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

自动控制原理

华北水利水电学院 孙美凤 王玲花 主编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

全书共分九章,前八章主要介绍线性系统的控制理论,第九章简要介绍了非线性系统的描述函数法。其主要内容包括自动控制理论的基本概念,自动控制系统数学模型的建立方法,时域分析法,根轨迹法,频率分析法,自动控制系统的校正方法,离散系统分析法以及现代控制理论的状态空间法,以及非线性控制系统的描述函数分析法。此外,在不同章节中,还介绍了 MATLAB 在控制系统分析与设计中的应用。

本书是根据国家有关自动控制理论教学大纲编写而成的,面向热能与动力工程、电气自动化、自动化、环境工程以及计算机等专业的师生,也可供其他专业师生和工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

自动控制原理 / 孙美凤, 王玲花主编. —北京: 中国水利水电出版社, 2007

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-5084-4614-1

I. 自… II. ①孙…②王… III. 自动控制理论—高等学校—教材 IV. TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 067986 号

书 名	普通高等教育“十一五”国家级规划教材 自动控制原理
作 者	华北水利水电学院 孙美凤 王玲花 主编
出版 发行	中国水利水电出版社(北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68202286(发行) 6831835(营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994, 63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	787mm×1092mm 16 开本 17 印张 403 千字
版 次	2007 年 6 月第 1 版 2007 年 6 月第 1 次印刷
印 数	0001—4100 册
定 价	31.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

本书是作者在总结多年从事《自动控制原理》教学经验及控制系统工程实践的基础上编写而成的。本书初稿作为讲义已在教学中使用多年,任课教师与学生普遍反映该讲义教学效果较好。因此,现在正式出版,希望对同类专业的学生或工程技术人员有所帮助。

《自动控制原理》一书共分九章,以讲授经典控制理论为主。对现代控制理论介绍一些基本理论与方法,作为进一步学习现代控制理论的基础。该书从自动控制系统的基本概念入手,介绍自动控制系统数学模型的建立方法,时域法、根轨迹法、频率法等分析方法,自动控制系统的校正方法,离散系统分析法,现代控制理论的状态空间法,以及非线性控制系统的描述函数分析法。此外,在不同章节中,还介绍了 MATLAB 在控制系统分析与设计中的应用。

本书由孙美凤与王玲花主编。孙美凤编写第一、四、五章与第二章第八节、第三章第七节、第六章第七节;王玲花编写第六、七章;楚清河编写第二、三章;高胜建编写第八、九章。白家骢教授对全书内容进行了认真的审核,在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中难免有错误和不当之处,欢迎使用本书的广大师生及其他读者给予指正。

编 者

2007 年 5 月

目 录

前言

第一章 自动控制系统的基本概念	1
1.1 概述	1
1.2 自动控制系统的基本原理	1
1.3 反馈控制系统的基本组成	5
1.4 对自动控制系统的基本要求	7
1.5 自动控制系统的分类	8
1.6 自动控制系统的典型输入信号	10
1.7 自动控制理论的发展	13
本章小结	14
习题	15
第二章 自动控制系统的数学模型	18
2.1 自动控制系统微分方程的建立	18
2.2 非线性特性的线性化	20
2.3 传递函数	21
2.4 典型环节及其传递函数	24
2.5 控制系统的方框图	31
2.6 信号流图	37
2.7 自动控制数学基础——拉氏变换	41
2.8 MATLAB 简介	46
本章小结	48
习题	49
第三章 时域分析法	54
3.1 线性系统的时域响应性能指标	54
3.2 一阶系统的时域分析	55
3.3 二阶系统的时域分析	57
3.4 高阶系统的时域分析	64
3.5 自动控制系统的稳定性	66

3.6 自动控制系统的稳态误差	72
3.7 用 MATLAB 进行瞬态响应及稳定性分析	80
本章小结	83
习题	83
第四章 根轨迹法	87
4.1 自动控制系统的根轨迹	87
4.2 根轨迹绘制规则	89
4.3 广义根轨迹	98
4.4 控制系统的根轨迹分析	103
4.5 利用 MATLAB 绘制根轨迹	105
本章小结	107
习题	107
第五章 线性系统频率响应分析法	111
5.1 频率特性	111
5.2 典型环节的频率特性	115
5.3 开环频率特性曲线的绘制	121
5.4 奈奎斯特稳定判据	129
5.5 稳定裕度	136
5.6 开环对数频率特性与系统性能的关系	139
5.7 利用 MATLAB 绘制系统频率特性曲线	142
本章小结	145
习题	145
第六章 自动控制系统的校正	148
6.1 系统校正的基本概念	148
6.2 串联超前校正	153
6.3 串联滞后校正	159
6.4 串联滞后—超前校正	164
6.5 反馈校正	171
6.6 复合控制校正	174
6.7 利用 MATLAB 进行系统设计	175
本章小结	178
习题	179
第七章 线性离散系统	181
7.1 离散系统的基本概念	181
7.2 采样过程和采样定理	183
7.3 信号恢复与信号保持	186
7.4 z 变换理论	189

7.5 线性离散系统的脉冲传递函数	196
7.6 线性离散控制系统的分析	202
7.7 根轨迹与频率法在离散系统中的应用	210
本章小结	213
习题	214
第八章 线性系统的状态空间分析法	216
8.1 状态空间基本概念	216
8.2 建立状态空间表达式的方法	220
8.3 状态空间表达式的解	228
8.4 状态能控性和能观性	236
本章小结	243
习题	243
第九章 非线性系统的描述函数分析	246
9.1 非线性控制系统	246
9.2 描述函数	249
9.3 非线性系统的描述函数分析	256
本章小结	260
习题	261
参考文献	263

第一章 自动控制系统的基本概念

1.1 概 述

20 世纪初以来,控制科学与控制技术发展迅速,极大地提高了劳动生产率和产品质量,改善了劳动条件,推动了现代工、农业的巨大进步。特别是随着现代数字计算机技术的迅速发展,在军事、航空航天、工业自动化与电力系统自动化、水电机组与汽轮机组、核能等方面控制技术起着非常重要的作用。自动控制和信息处理是自动化技术的两个非常重要的支柱。

所谓**自动控制**,是指在生产过程中无人直接参与的情况下,利用控制装置代替人的控制,使被控对象的被控量维持预期的水平或按一定规律变化。**被控对象**(或称控制对象)是指控制系统进行控制的受控客体,如飞机、火箭、导弹、人造卫星、发电机、水轮发电机组、锅炉、工业加热炉、各种机器设备或生产过程等,被控对象要实现控制的量称为**被控量**,如飞机的速度和姿态角,电机的转速与电压,生产过程中的压力、流量、水位、温度、湿度、转速、位移等。**控制装置**(又称控制器)是指对控制对象进行控制的设备装置总体,如水轮机调速器、电力系统的电压调节器等。由被控对象和控制器组成的系统,称为**自动控制系统**,如雷达自动跟踪系统,电机转速控制系统等。在水电站中除水轮发电机的频率(转速)控制器外还有电压控制器,金属切削机床的速度在电网电压或负载发生变化时能自动保持近似不变等,它们都是典型的自动控制的例子。

自动控制理论是研究关于自动控制系统的组成、性能分析和设计的理论,是研究如何改进动态系统的性能以达到所需目的的技术科学。对于一个自动控制系统,首先要了解其基本控制原理,然后以数学方法表达之,即用数学方法研究自动控制系统的性能或根据对系统提出的性能要求,确定一个控制器的数学模型。自动控制系统的种类很多,被控量各种各样,组成这些控制系统的元部件差异较大,但无论实际存在的物理系统的结构和被控制量是多么地不同,其表达这些系统动态特性的数学表达式却可能是同一类型,都可以归入自动控制理论研究的范畴。

1.2 自动控制系统的基本原理

为了实现各种复杂的控制任务,需要把被控对象和控制器连接起来,组成一个有机的控制系统,其组成形式有多种,按其工作原理可分为开环控制系统、闭环控制系统及复合控制系统。

1.2.1 开环控制系统

所谓开环控制系统，是指系统的输入不受输出影响的控制系统。在系统的输入端和输出端之间无反馈通路，仅仅有信号的前向通道，其系统方框图如图 1-1 所示。因此，开环控制系统又称为无反馈控制系统。

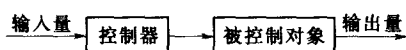


图 1-1 开环控制系统方框图

开环控制系统既可以采用按给定量的控制方式，也可以采用按扰动量的控制方式。按给定量控制的开环控制系统，其控制作用直接由系统的输入

量产生，控制精度完全由系统中的元件及校准的精度决定，如图 1-2 (a) 所示。这种开环控制方式没有自动修正偏差的能力，抗扰动性较差，但其结构简单，调整方便，成本低。在精度要求不高或扰动影响较小的情况下，可以采用这种控制方式，如自动洗衣机、自动售货机、产品自动生产流水线、交通红绿灯等的控制，都属于开环控制；又如水利工程中的溢流闸和冲沙闸门的控制，也为开环控制，只要给定闸门开启（或关闭）信号即可对其进行控制，而不需对输出信号（即流量）进行测量。对于按扰动量控制的开环控制系统，利用可测量的扰动量来修正（或补偿）控制作用，以减小或抵消扰动对输出量的影响，如图 1-2 (b) 所示。从干扰作用端到输出端，仅有顺向控制信号的传递而无反馈作用，这种控制方式又称顺馈控制。其特点是抗扰动性好，控制精度较高，但仅适用于扰动量可测的场合。控制系统一般存在多种扰动，要为每一种扰动配备一种补偿装置会使系统复杂化，可靠性也变差，而且各种补偿装置彼此间也会有矛盾，一般只对一种主要的扰动采用适当的补偿，另外再按闭环负反馈方式实现按偏差控制，以消除其他各种扰动造成的偏差。

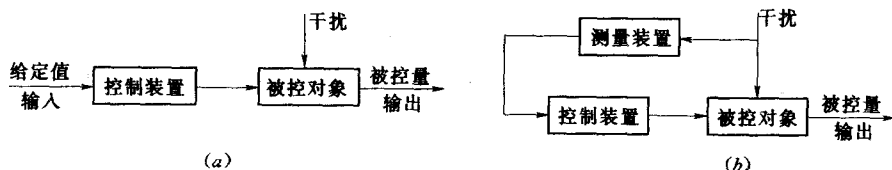


图 1-2 两种开环控制方式方框图

(a) 按给定量控制的开环控制；(b) 按扰动量控制的开环控制

1.2.2 闭环控制系统

闭环控制系统又称反馈控制系统。所谓反馈，是指将系统输出信号引回到输入端，并与输入信号相比较而产生偏差信号的过程。若反馈信号与输入信号相减，使产生的偏差逐步减小，称负反馈；反之，则为正反馈。一般反馈控制常采用负反馈，利用偏差信号进行控制，使产生的偏差减小或消除。由于引入了被控量的反馈信息，使整个控制系统成为一个闭合回路，因此反馈控制系统又称闭环控制系统。

反馈控制是一种非常重要并被广泛应用的控制方式，是自动控制理论研究的主要内容之一。图 1-3 (a) 为水轮机组转速（或频率）人工调节系统原理简图，为反馈控制。设机组处于单机带负荷工作状态，由人来控制机组的转速，在人的头脑中先有一个输入给定值（额定频率 50Hz）；而系统的实际输出值（实际频率）由频率表监视；阀门、机组及所带负荷是被控对象；人的大脑和双手是控制器。人眼是反馈测量元件。

当用户负荷发生变化时会对输出产生外扰；当系统中的某些环节如水轮机、发电机、阀门等自身参数发生变化时，也会影响输出值，这种扰动被称为内扰，内扰和外扰统称为扰动。由于扰动的作用，使系统输出的实际频率发生变化而偏离了给定值。由人眼观察频率表，将输出的实际频率值反馈给大脑，由大脑比较判断来发出控制信号，动手改变阀门的开度以增加或减小流量，使机组的实际频率跟踪给定值，并保持在规定的误差范围内，其系统方框图如图1-4所示。图1-3(b)所示为水轮机组转速自动调节系统原理简图。与上述所不同的是，系统的额定频率由给定元件以位移或电压的形式给定；机组的实际输出频率值由测量元件监测，并转化为位移或电压信号；由自动控制器代替了人的大脑和双手。当系统在扰动作用下，实际频率偏离额定值时，由加法器将给定信号与反馈信号进行综合比较，确定是否有偏差及偏差的方向，控制器根据偏差情况发出调节信号，并将偏差信号放大，命令执行元件来增加或减小阀门（或导水机构）的开度以调节流量。其系统方框图如图1-5所示。

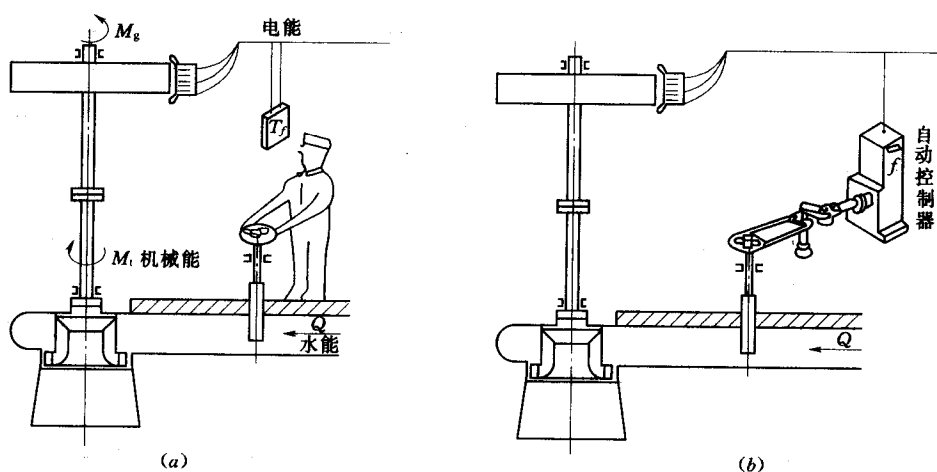


图 1-3 水轮机调节原理简图

(a) 人工反馈控制；(b) 自动反馈控制

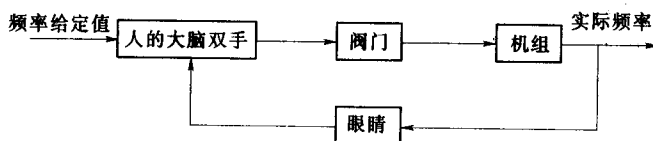


图 1-4 人工反馈控制系统方框图

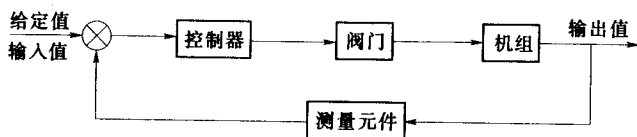


图 1-5 自动反馈控制系统方框图

又如汽轮机转速自动调节系统方框图如图1-6所示。感应机构即调速器，接受转速变化调节信号；传动放大机构将感应机构送来的调节信号进行幅值放大和功率放大，并进

行综合处理，传递给执行机构进行调节；汽轮机调节系统的执行机构是进汽调节阀和操纵机构，也称配汽机构；同步器即定值机构，其手动调节信号也送入传动放大机构，以改变进汽调节阀的开度。由图 1-6 可见，调速器感受信号来自汽轮机，而系统的动作结果又作用于汽轮机，形成一个闭环控制过程。

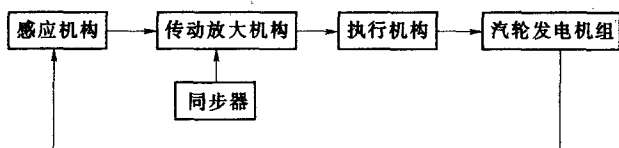


图 1-6 汽轮机自动调节系统方框图

由上述实例可以看出，闭环控制系统主要由控制器、被控对象和测量元件组成，如图 1-7 所示。控制器的输入信号是系统的输入量和测量元件输出信号的差值，输入量为给定值（期望值），测量元件输出信号是系统输出量本身或是它的函数。当有偏差存在时，控制器就改变控制对象的工作参数，以维持输出量为期望值，最终消除偏差。

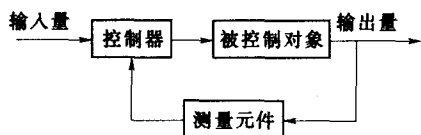


图 1-7 闭环控制系统方框图

可见，闭环控制系统不仅具有抑制任何内、外扰动对被控量产生影响的能力，而且还能够获得满意的动态特性，有较高的控制精度和可靠性；同时，闭环控制对参数变化不敏感，也使得元件的制造成本降低；此外也大大地减轻了人的劳动强度，提高了生产效率。正是由于闭环控制方式的这些特点，才使得它的应用非常广泛。但是，引入反馈会增加系统的复杂性，如果闭环系统参数选取不当，系统可能会产生振荡，甚至使系统失稳而无法工作，因此增加了控制系统分析和设计的复杂性。

1.2.3 复合控制系统

根据开环控制和闭环控制的特点可以看出：比较合理的控制方式是按偏差控制和按扰动控制结合起来，这种控制方式称为复合控制。复合控制有两种基本形式：按输入前馈补偿的复合控制和按扰动前馈补偿的复合控制，如图 1-8 所示。因反馈控制具有滞后性，尤其是控制对象具有较大延迟时，反馈控制不能及时地影响输出的变化，而前馈控制在扰动信号还没有对输出产生影响之前就做出相应的控制。因此，复合控制是高精度控制系统的一种有效的控制方式。如图 1-9 所示，为一同时按偏差和扰动控制电动机速度的复合控制系统。

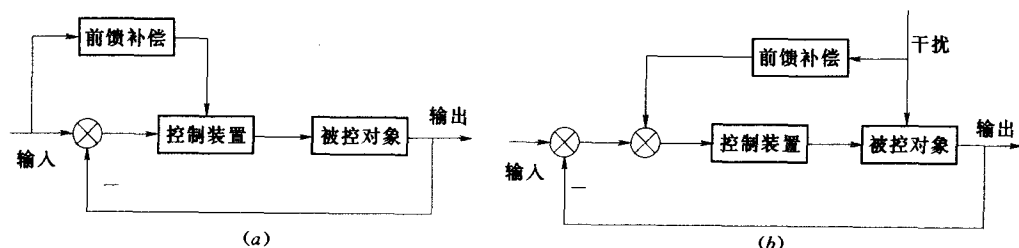


图 1-8 复合控制系统方框图

(a) 附加输入信号补偿；(b) 附加干扰补偿

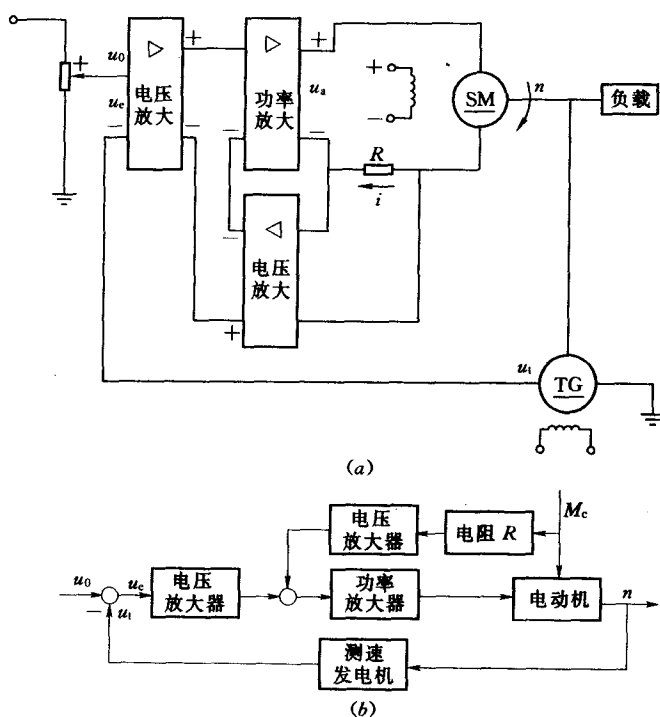


图 1-9 电动机速度复合控制系统

(a) 系统原理图; (b) 系统方框图

1.3 反馈控制系统的基本组成

尽管大多数反馈控制系统的控制器和被控对象在具体结构上存在着差异,但从闭环控制的基本原理来看,它们都遵守同一规律,即出现偏差,使控制器输出指令,改变被控制对象或过程的工作参数,导致输出量与给定值的差值变小或为零。这种检测偏差至纠正偏差的过程都是一致的。可见各种闭环控制系统在组成上具有共性。控制系统主要是由几部分组成的,每个部分或环节起着特定的作用,其典型结构方框图如图 1-10 所示,由控制对象和控制器组成。图中“ $\otimes$ ”表示比较元件,“+”表示正反馈(一般省略不写),“-”表示负反馈。从输入端沿箭头方向到达输出端的信号通路称前向通路;系统输出信号经测量元件反馈到输入端的通路称主反馈通路。前向通路和主反馈通路共同构成主回路,由局部反馈通路构成内回路,只包含一个主反馈通路的系统称单回路系统;有两个或两个以上反馈通路的系统称多回路系统。从图中可看出,该系统由以下几个部分组成。

1. 被控对象

它是要求实现自动控制的设备或过程,其被控制的物理量,即系统的输出。

2. 控制器

它是由下述几个元件组成的。

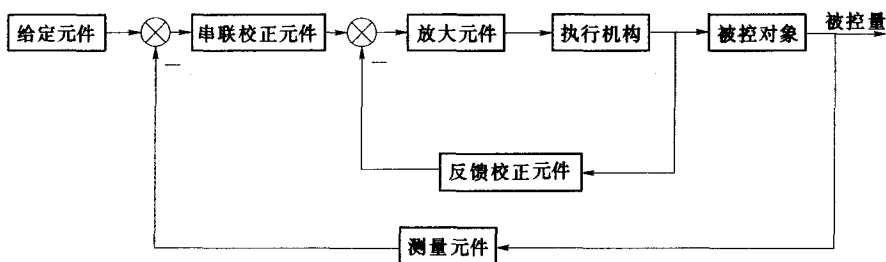


图 1-10 负反馈控制系统的基本组成

(1) 测量元件：测量被控制量并将其转换成与给定信号相同的物理量。测量装置有位置传感器、速度传感器和压力、温度、流量传感器等。如果被测的物理量为非电量信号，一般要转换为电量信号。若被控制量是温度，常用热电偶作为测量元件；若被控制量是角度，则常采用电位器、旋转变压器或自整角机；若被控制量是位移则采用位移传感器；若被控制量是轴的转速，则常采用测速发电机作为测量元件。通常要求测量元件稳定可靠，具有较高的灵敏度，较宽的测量范围，较好的线性度，测量精度满足要求，不受环境条件（如温度与磁场干扰）的影响。因此，随着控制技术的发展，新的测量元件不断被研制出来，使测量出的反馈信号更加准确可靠。

(2) 给定元件：用于产生给定信号或输入值，由人工设定或自动装置给定信号机构产生。

(3) 比较元件：将测量元件测出的信号与输入给定值进行比较，得到偏差信号。如差动放大器、桥式双电位计、机械差动装置、旋转变压器等。

(4) 放大元件：通常比较元件给出的偏差信号过于微弱，不能直接推动执行元件去控制被控对象，可用放大元件使该偏差信号放大。放大元件的输出必须有足够的功率。对于电信号，放大元件通常包括电压放大级和功率放大级，用电子管、晶体管、集成电路、可控硅器件、电机放大器等做成。

(5) 执行元件：执行元件按照控制信号操纵控制机构，改变被控制对象的工作参数，以纠正输出信号与给定值之间的偏差。执行元件通常有阀、电动机、液压马达等。执行元件根据操作能源的不同可分为电动、气动、液压三类。电动执行元件安装灵活，使用方便，应用最广；气动执行元件结构简单，重量轻，工作可靠，且有防爆特性，在中、小功率的化工、石油设备和机械工业自动生产线上应用较多；液压执行元件功率大，快速性好，运行平稳，广泛应用于大功率的控制系统中，如水轮机调节系统中就采用二级液压放大装置来推动庞大而笨重的导水机构。

(6) 校正元件：对于一个控制系统，如果控制器的动态性能与被控对象不相适应，那么整个控制系统的性能可能会很差，甚至不能发挥控制作用。因此，实际系统中总要引入校正元件以改善系统的性能。校正元件是结构和参数便于调整的元件，形成所谓的“控制规律”，用串连或反馈的方式连接在系统中。最简单的校正元件是由电阻和电容组成的无源或有源网络，而复杂的校正元件则含有计算机。

在实际的控制系统中，同一个元件或部件有时可以兼备几种职能。

1.4 对自动控制系统的基本要求

自动控制理论的灵魂就是用动态和变化的观点来研究动力学系统的动态特性。动力系统都含有储能元件或惯性元件，如电路中的电感与电容，机组的转动惯量，物体的质量等。储能元件的能量不可能突变，因而系统的输出量和反馈量总是滞后于输入量的变化。当系统受到扰动或输入量变化时，输出量从原平衡状态变化到新的平衡状态的全过程称为过渡过程（暂态过程或瞬态过程）。在过渡过程中被控量随时间变化的关系称为动态特性。

过渡过程结束后的输出响应称为稳态过程。在稳态过程中输出量和输入量的关系称为控制系统的静特性，期间输入量及其响应均不随时间而变化。图 1-11 是水轮机调节系统的静特性，系统输入量为负荷 N ，输出量为发电机转速 n 。图中曲线②是无差调节，曲线①、③是有差调节。

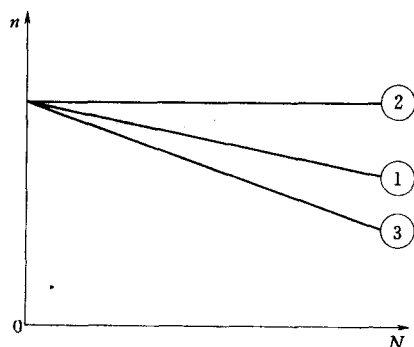


图 1-11 水轮机调节系统静态特性

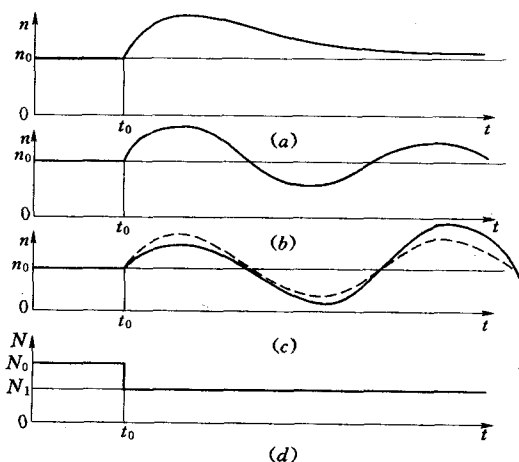


图 1-12 水轮机调节系统动态特性

(a) 非周期衰减过程；(b) 振荡衰减过程；
(c) 等幅振荡（虚线）与扩散振荡过程；(d) 负荷扰动

图 1-12 是水轮机调节系统在负荷阶跃扰动下的动态特性，在 t_0 时刻负荷由 N_0 下降至 N_1 后保持不变。在 t_0 时刻前机组转速为 n_0 ，在 $t > t_0$ 时机组转速 n 呈现出随时间变化的过渡过程，以曲线 $n=f(t)$ 表示，其形式有非周期衰减过程、振荡衰减过程、等幅或扩散振荡过程。可见图 1-12 (a)、图 1-12 (b) 的暂态过程可以稳定下来，而图 1-12 (c) 则无法达到稳定。

尽管各种实际的自动控制系统类型不同，并且对每个系统的性能要求也往往不同，但对控制系统的共同基本要求是一样的，即应满足稳定性、准确性、速动性及抗干扰性等综合指标。

(1) 稳定性：对于处于平衡状态的系统，当受到扰动作用时其输出量将偏离原平衡状态的值，但当扰动消除后系统又恢复到原平衡状态（或达到新的平衡状态）的能力。一个不稳定的系统将无法正常工作，而只有稳定的系统才有使用价值。因此，稳定性是控制系统应满足的最基本要求。



(2) 良好的动态特性：一般是指系统具有较小的超调量、较少的振荡次数和较短的调节时间。而实际的控制系统不仅要满足稳定性要求，而且还要满足对其过渡过程形式和过渡过程时间（即快速性）提出的具体要求。如对于稳定的自动驾驶仪系统，当飞机受阵风扰动而偏离预定航线时，具有自动使飞机恢复预定航线的能力，但在恢复过程中，若机身摇晃幅度过大或恢复速度过快，就会使乘客感到不适；又如水轮机控制系统对实时性要求较高，在满足稳定要求的同时，当发生负荷波动时，必须快速做出反应，且调节过程中的振荡次数和振幅等动态特性应满足要求。

(3) 稳态误差：在过渡过程结束后，我们所希望的是：被控量的稳态值应与期望值相同。但因实际系统的结构、外作用的形式及元部件间的摩擦和间隙等非线性因素的影响，被控量的稳态值与期望值之间会有误差，称为稳态误差。稳态误差越小，则控制精度（准确性）越高。因此，应尽量使稳态误差减小到某个允许的范围内，它是衡量控制系统稳态性能的一项重要指标。

1.5 自动控制系统的分类

根据控制系统的工作原理、功能和组成以及研究的目的等，控制系统有多种分类法。按控制原理可分为开环、闭环和复合控制系统；按控制系统的数学模型可分为线性系统 and 非线性系统（进而根据系统的参数是否随时间变化，又分为定常系统和时变系统）；按系统内部信号特征可分为连续系统和离散系统；对线性定常连续系统，按输入信号变化规律可分为恒值控制系统、随动控制系统、程序控制系统；按输入与输出项的数目可分为单输入—单输出系统、多输入—多输出系统等；按系统功能可分为转速控制系统、位置控制系统、压力控制系统、温度控制系统等；按系统元件类型可分为机械控制系统、机电控制系统、液压控制系统、气动控制系统、生物控制系统等。因此，各种分类法从不同的角度反应了系统的特点，可以组合应用。

1.5.1 线性系统和非线性系统

1. 线性系统

数学模型是线性微分（或差分）方程的系统，称为线性系统。线性连续系统对应线性微分方程；线性离散系统对应线性差分方程。一般地，单输入—单输出系统的微分方程可表示为

$$\begin{aligned} a_0 \frac{d^n c(t)}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} c(t)}{dt^{n-1}} + \cdots + a_{n-1} \frac{d c(t)}{dt} + a_n c(t) \\ = b_0 \frac{d^m r(t)}{dt^m} + b_1 \frac{d^{m-1} r(t)}{dt^{m-1}} + \cdots + b_{m-1} \frac{d r(t)}{dt} + b_m r(t) \quad (n \geq m) \quad (1-1) \end{aligned}$$

式中方程左边 $c(t)$ 是被控输出量，为待求量；方程右边 $r(t)$ 是系统输入量，为已知量。当系数 $a_0, a_1, \cdots, a_n$ 与 $b_0, b_1, \cdots, b_m$ 为常数时，称为定常系统；当系数随时间变化时，称为时变系统。例如： $4 \frac{d^3 y(t)}{dt^3} + 5 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + 6 \frac{dy(t)}{dt} + 7y(t) = 0$ 与 $a \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + b \frac{dy(t)}{dt} + cy(t) = A \frac{du(t)}{dt} + Bu(t)$ (a, b, c, A, B 均为常数) 都是线性定常系统。



线性系统的最重要特征是可以应用**叠加原理**。当有几个输入信号同时作用于系统时，系统输出响应等于每个输入信号单独作用所产生的输出响应之和，这就是可叠加性。如 $r_1(t)$ 和 $r_2(t)$ 分别作用于系统时产生的响应为 $c_1(t)$ 和 $c_2(t)$ ，则当输入信号为 $r(t) = r_1(t) + r_2(t)$ 时，输出响应为 $c(t) = c_1(t) + c_2(t)$ ；当输入信号扩大 k 倍时，则输出响应也扩大 k 倍，即 $r(t) = k r_1(t)$ ，则 $c(t) = k c_1(t)$ ，这就是均匀性。因此，利用这一原理可使系统分析大为简化。如在初始条件不为零时，可将线性系统的响应分解为零输入响应和零状态响应，对此我们不作深入讨论。

2. 非线性系统

数学模型是**非线性微分（或差分）方程**的系统，称为非线性系统。即其系数中至少有一项包含有系统某个变量（不是自变量 t ）的函数，或方程中含有变量导数的高次幂，如

$$\frac{d^2 c(t)}{dt^2} + \left(\frac{dc(t)}{dt} \right)^2 + c(t) = r(t)$$

$$[c(t) - 1] \frac{dc(t)}{dt} + c(t) = r(t) \frac{dr(t)}{dt}$$

非线性系统不满足叠加原理，各项系数中含有变量或其函数，且各项导数也非一次型。线性系统是自动控制系统中最重要、最常见的一种，目前对线性系统的理论分析很完善，并具有普遍运用的解析方法，是控制系统研究的理论支柱。**对非线性程度不太严重的元部件，可在一定范围内线性化**，从而近似为线性系统以使问题得以简化。而对于不能进行线性化处理的非线性系统，则要采用专门的非线性理论分析方法。

实际的物理系统都含有程度不同的非线性元部件，如放大器和电磁元件的饱和特性，运动部件的死区、间隙和摩擦特性等。非线性系统远比线性系统复杂，所包含的现象也十分丰富，但不能应用叠加原理，目前还缺乏统一有效的数学分析工具。其研究方法是针对一个个具体的非线性控制系统，由简单到复杂，由特殊到一般发展起来的。迄今人们对它的了解还很不够，因而一直是众多学者探索的领域。

1.5.2 恒值系统、随动系统及程序控制系统

控制工程的目标是使被控制量按照指定的规律变化。但是因各种外界扰动作用于系统，使被控制量偏离指定的规律；同时控制系统本身还存在着惯性，致使被控制量的变化滞后。根据控制系统研究的侧重点的不同，可以分为恒值系统、随动系统及程序控制系统。

1. 恒值系统

是指系统的输入给定值为常量（或是变化很缓慢的量），由于扰动的作用，被控量偏离给定值而出现偏差，控制系统便根据偏差的大小和方向产生控制作用，使被控量恢复到给定值或其允许的范围内。其中给定值可以随生产条件的变化而改变，一经调整后，被控量就应与调整好的给定值保持一致。因此，扰动是引起恒值控制系统产生调节的主要原因。研究扰动对被控对象的影响以及抗扰动措施，是恒值系统分析与设计的重点任务。如自动电压调节系统、水轮机调节系统、电动机速度控制系统、恒温、恒压系统等都属于这类系统。

在工业生产过程控制中，如果被控量是温度、压力、流量、液位、浓度等过程参数，



称为过程控制系统。它们大多属于恒值控制系统。

2. 随动系统

是指系统的输入给定量是一个随机变化的时间函数，要求被控量以尽可能小的误差跟随给定量的变化。其中扰动的影响是次要的，主要是系统的惯性而引起被控量偏离输入量。因此，研究被控量跟随的快速性和准确性是随动系统分析和设计的重点。属于随动系统的如雷达高射炮的角度控制系统，必须使炮身时刻跟随飞行器的飞行，而飞行器的方位是随时变化的；又如转桨式水轮机的轮叶控制系统，轮叶随动于导叶。

在随动系统中，被控量为机械位移或其导数（速度、加速度），称为伺服系统。如船舶的自动驾驶，导弹和飞船的制导等。

3. 程序控制系统

系统的输入给定量是按预定规律随时间变化的函数，要求被控量快速而准确地复现。如数字程序控制机床，汽轮发电机组与水轮发电机组的启动的控制等。

恒值控制系统是程序控制系统的特例，它们的输入量都是时间的函数。

1.5.3 连续系统和离散系统

连续系统是指系统中各元部件传递的信号均是模拟量且是时间的连续函数，其数学模型用微分方程描述。

离散系统指系统中至少有一个元件的信号为脉冲序列或数字等形式，是时间的离散函数，其数学模型用差分方程描述。连续信号经过采样开关采样变成离散信号，这样的系统称为采样数据控制系统；如果这种离散信号的幅值经过量化，则称为数字控制系统。如含有计算机的控制系统即为典型的数字控制系统。实际的物理系统多为连续系统，离散系统是在连续系统的基础上发展而来的。由于计算机技术的应用，使得离散控制系统得以实现。

此外，随着计算机技术和各种现代控制技术的快速发展及应用，已经出现了许多新的控制方式，如最优控制、极值控制、自适应控制、模糊控制与神经网络控制等。这里不深入讨论，可参阅其他有关书籍。

1.6 自动控制系统的典型输入信号

实际的控制系统受到的外作用形式有多种。一般加到控制系统上的外作用主要有两种类型，一种为有用输入，另一种为扰动。输入量又称输入信号、给定值，它是一种有用输入，决定系统被控量的变化规律；而扰动则是系统不希望有的外作用，它破坏有用输入对系统的控制。在实际系统中，扰动总是不可避免的，而且它可以作用于系统中的任何元部件上，也可能一个系统同时受到几种扰动的作用。电源电压的波动，环境温度、压力以及负载的变化，飞行中的冲击，航海中的波浪等都是现实中存在的扰动。控制系统通常都具有输入量、干扰量和输出量，控制系统通过这些量与外部进行联系。控制对象的输出量即被控量应严格加以控制，它可以保持为某一恒定值，也可以按照某个给定的规律变化。输出量与输入量之间的内部关系则取决于系统本身固有的运动规律和特性。

输入信号一般为确定性外作用，而扰动信号一般为随机性外作用。在不同形式的外作