



“十一五”规划教材

自动控制理论

沈传文 肖国春 于敏 甘永梅



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

“十一五”规划教材

TP13

207

2007

自动控制理论

沈传文 肖国春 于敏 甘永梅



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

本教材比较全面地阐述了自动控制理论的基本内容。全书共分 8 章,主要讲述了自动控制的基本概念,控制系统数学模型的建立,用时域分析、根轨迹及频域方法对连续系统进行分析,对控制系统的校正方法进行了研究,对采样控制理论的基本内容和现代控制理论的基本内容进行了介绍。各章均安排采用 MATLAB 仿真的控制系统分析与应用实例。

本书适合作为电气工程及自动化、电子科学与技术、工业自动化等相关专业作为教材及教学参考书,也可供有关师生和专业工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制理论/沈传文,肖国春,于敏,甘永梅
编. —西安:西安交通大学出版社,2007. 1
ISBN 978-7-5605-2166-4

I. 自… II. ①沈…②肖…③于…④甘…
III. 自动控制理论 IV. TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 141399 号

书 名:自动控制理论
编 著:沈传文 肖国春 于 敏 甘永梅
出版发行:西安交通大学出版社
地 址:西安市兴庆南路 25 号(邮编:710049)
电 话:(029)82668357 82667874(发行部)
(029)82668315 82669096(总编办)
印 刷:西安建筑科技大学印刷厂
字 数:413 千字
开 本:727 mm×960 mm 1/16
印 张:22.25
版 次:2007 年 1 月第 1 版 2007 年 1 月第 1 次印刷
书 号:ISBN 978-7-5605-2166-4/TP·474
定 价:27.00 元

前 言

自动控制理论是各类工程技术人员所必须掌握的技术基础知识,通过该课程的学习,可以从宏观上了解自动控制系统的结构、性质和任务。随着现代化技术的不断发展,自动化技术越来越深入各行各业以及人们的生活。大专院校中越来越多的专业将“自动控制原理”作为必修课程。

随着科学技术的发展,适时地改进自动控制理论教材也是当前课程改革的要求,本教材在分析研究国内外相关的教材的基础上,依据高等院校本科自动化控制理论课程的教学要求,从注重理论基础与基本概念,拓宽专业面出发,结合电气自动化及其它相近专业的教学特点,比较全面地阐述了自动控制理论的基本内容,全书共分八章,包括经典控制理论、采样控制理论、现代控制理论的基本内容。

本教材具有以下几个特点:

1. 从基本理论和概念出发,精练内容,突出重点,淡化繁冗的理论推导,注重理论与实际的结合。

2. 为读者更好地掌握应用所学的知识,适应计算机仿真在控制系统中应用越来越广的要求,全书从 MATLAB 软件使用基础出发,各章均安排了采用 MATLAB 仿真的控制系统分析与应用实例。

3. 为了更好的将理论与实际相结合,全书对硬盘驱动系统这一控制实例,依据各章所学内容,在各章中对其进行系统分析,数学建模,性能分析,和控制器设计等工作,以深化读者对控制理论在实际系统中应用的理解。

4. 为了便于读者自学和更好地掌握本课程的基本理论,锻炼和培养分析、综合及解决实际问题的能力,各章均备有适当的例题和习题,并给出小结,供读者学习和归纳使用。

全书由沈传文、肖国春、于敏、甘永梅编写。于敏编写第 1,2 章;肖国春编写第 3,4 章;甘永梅编写第 7,8 章,沈传文编写第 5,6 章,并对全书进行了统稿。苏彦民教授仔细审阅了本书全稿,并提出许多宝贵意见,在此谨致以衷心的感谢。由于编者水平有限,书中难免存在错误和疏漏之处,殷切希望读者批评指正。

编 者

2006.11

目 录

第 1 章 绪 论	(1)
1.1 自动控制系统的基本概念与发展	(1)
1.2 自动控制系统的基本控制方式	(2)
1.3 自动控制系统的基本类型	(5)
1.4 对控制系统的要求和本书内容简介	(10)
1.5 连续设计示例:硬盘读写系统	(11)
1.6 小结	(12)
习题	(13)
第 2 章 线性系统的数学模型	(17)
2.1 引言	(17)
2.2 典型环节的微分方程	(18)
2.3 典型环节的传递函数	(21)
2.4 线性系统结构图	(26)
2.5 线性系统的信号流图	(34)
2.6 线性控制系统数学模型的建立	(39)
2.7 非线性数学模型的线性化	(47)
2.8 响应曲线法辨识系统的数学模型	(48)
2.9 利用 MATLAB 建立 SISO 系统的数学模型	(53)
2.10 连续设计示例:硬盘读写系统的数学模型建立	(61)
2.11 小结	(63)
习题	(64)
第 3 章 线性系统的时域分析	(71)
3.1 典型试验信号与系统性能指标	(71)
3.2 一阶系统的时域分析	(75)
3.3 二阶系统的时域分析	(78)
3.4 高阶系统的时域分析	(84)
3.5 线性系统的稳定性分析	(86)
3.6 线性系统的稳态误差计算	(91)
3.7 基于 MATLAB 的线性系统时域分析	(97)

3.8	连续设计示例: 硬盘读写系统的时域分析	(101)
3.9	小结	(108)
	习题	(109)
第4章	线性系统的根轨迹法	(114)
4.1	根轨迹法的基本概念	(114)
4.2	根轨迹的基本条件	(116)
4.3	绘制根轨迹的基本规则	(119)
4.4	参量根轨迹的绘制	(133)
4.5	用根轨迹法分析控制系统性能	(135)
4.6	用 MATLAB 绘制控制系统的根轨迹	(138)
4.7	连续设计示例: 硬盘读写系统的根轨迹法	(142)
4.8	小结	(144)
	习题	(145)
第5章	线性系统的频率法分析	(149)
5.1	频率特性的基本概念	(149)
5.2	典型环节的频率特性	(151)
5.3	系统开环频率特性的绘制	(162)
5.4	用频率法分析系统稳定性	(168)
5.5	对数判据	(177)
5.6	用频率法分析系统品质	(180)
5.7	基于 MATLAB 的频率法分析	(185)
5.8	连续设计示例: 硬盘读写系统的频率法分析	(189)
5.9	小结	(192)
	习题	(192)
第6章	线性系统的校正方法	(196)
6.1	系统校正概述	(196)
6.2	常用校正装置及其特性	(200)
6.3	串联校正	(207)
6.4	应用频率法对系统进行串联校正	(217)
6.5	按期望模型对系统进行串联校正	(224)
6.6	用 MATLAB 实现系统校正	(228)
6.7	连续设计示例: 硬盘读写系统的校正	(235)
6.8	小结	(237)
	习题	(238)

第 7 章 线性离散系统的分析与综合	(241)
7.1 离散系统的基本概念	(241)
7.2 信号的采样与保持	(245)
7.3 z 变换理论	(250)
7.4 线性离散系统的数学模型	(255)
7.5 线性离散系统的稳定性与稳态误差	(264)
7.6 离散系统的动态性能分析	(274)
7.7 数字 PID 校正	(279)
7.8 基于 MATLAB 的离散控制系统分析	(282)
7.9 连续设计示例:硬盘读写系统的离散控制系统设计	(286)
7.10 小结	(288)
习题	(288)
第 8 章 线性系统的状态空间分析与设计	(292)
8.1 线性系统的状态空间描述	(292)
8.2 动态方程的响应	(313)
8.3 线性系统的能控性和能观性	(318)
8.4 状态反馈与状态观测器	(324)
8.5 基于 MATLAB 的线性系统状态空间分析	(331)
8.6 连续设计示例:硬盘读写系统状态空间分析和设计	(337)
8.7 小结	(338)
习题	(339)
附录 1 常用函数的拉氏变换和 z 变换对照表	(343)
附录 2 常用 MATLAB 命令	(344)
参考文献	(347)

第 1 章 绪 论

1.1 自动控制系统的基本概念与发展

1.1.1 自动控制的定义与发展

在现代科学技术的众多领域中,自动控制技术起着越来越重要的作用。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操纵机器、设备或生产过程,使其自动按预定规律运行的技术。

这里所说的外加设备或装置,通常包括测量仪器、控制装置和执行机构。没有检测与执行设备,单独的控制器是无法发挥作用的。

自动控制理论是研究自动控制共同规律的技术科学,它的发展初期是以反馈理论为基础的自动调节原理,主要用于工业控制,一般公认 1788 年由瓦特发明的蒸汽机离心调速器是最早的自动控制装置。第二次世界大战期间,人们设计和制造飞机及船用自动驾驶仪、火炮定位系统、雷达跟踪系统以及其它基于反馈原理的军用装备,进一步促进并完善了自动控制理论的发展。到二战结束后已形成完整的自动控制理论体系,这就是以传递函数为基础的经典控制理论,它主要研究单输入-单输出、线性定常控制系统的分析和设计问题。

20 世纪 60 年代初期,为适应宇航技术的发展,出现了区别于经典理论的现代控制理论。它主要研究具有高性能、高精度的多变量变参数系统的最优控制问题,主要采用的方法是以状态为基础的状态空间法,该方法大量借助计算机实现复杂的数学处理和计算,可以说现代控制方法是随着计算机的发展而建立起来的。目前,自动控制理论的研究还在继续,朝着以控制论、信息论、仿生学为基础的智能控制理论方向深入发展。

1.1.2 自动控制系统的基本组成

自动控制系统的组成基本上是一个仿人的工作装置。如图 1.1 所示,人的眼睛是测量装置,大脑是控制器,手及手臂是执行装置。可以将图 1.1 画成图 1.2 所示的方框图。

一个反馈控制系统基本由图 1.2 所示的三部分组成。

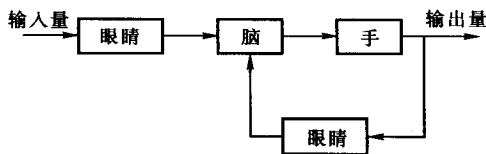


图 1.1 人脑控制过程示意图

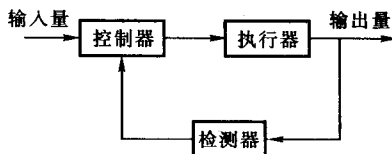


图 1.2 仿人控制系统方框图

1.2 自动控制系统的的基本控制方式

1.2.1 开环控制系统

所谓开环控制系统是指控制器与被控对象之间只有顺向作用而无反向联系,即控制是单方向进行的;系统的输出量并不影响其控制作用,控制作用直接由系统输入量产生。图 1.3 所示的电动机转速控制系统可以作为开环控制系统的实例。直流电动机带动生产机构以一定转速旋转,其转速由电位器的给定电压来决定,改变电位器滑动端的位置,则改变给定电压的大小,放大器的输入、输出和电动机的电枢电压也相应发生改变,从而自动地决定了电动机转速的高低,以满足生产机构的要求。

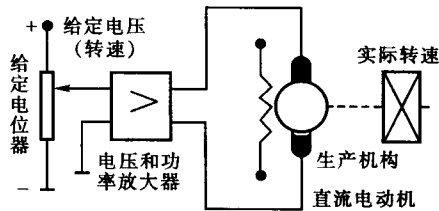


图 1.3 电动机转速控制系统

因此开环控制系统可用图 1.4 所示框图来表示。开环控制系统是最基本的不带反馈(检测装置)的自动控制系统,它们在生产过程及生活设施中随处可见。

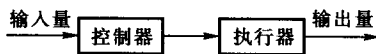


图 1.4 开环控制系统示意图

1.2.2 闭环控制系统

由于系统周围环境的变化会给系统造成干扰,开环控制系统的输出量不可能精确地对应于输入量,因此开环系统不具备克服输出量与输入量之间的偏差的能力,它的准确性和稳态精度都不高。如果系统输入量又随时间变化,而系统的被控对象一般都存在惯性,所以不可能瞬时完成对输入量的响应。

针对开环系统的上述缺陷,十分需要给控制系统引入反馈,即把输出量馈送到系统输入端,以便与输入信号进行比较,取其偏差作为控制器的输入,如图1.5所示。这样的系统称为带负反馈的闭环控制系统。其中由输入到输出的路径称为前向通路,检测装置所在的路径称为反馈通路。扰动量分为内扰和外扰,内扰是由于组成系统的元部件参数的变化引起;外扰则是由系统的动力源或负载变化等外部因素所引起。图1.5所示的扰动量是内扰和外扰的概括。值得注意的是,加在控制器上的信号并不是系统的输入量,而是它和系统反馈量之间的误差。控制器所产生的控制作用施与被控对象之后,又力图减小或者消除这种误差。图1.6所示电加热系统是一个简单的闭环控制系统。其中温控开关是控制器,输入量是期望温度,输出量是测温元件检测到的实际水温,输入与输出之间的求差过程直接由温控开关完成。该系统的外扰动量是注入的冷水和流出的热水。电加热器为执行机构。

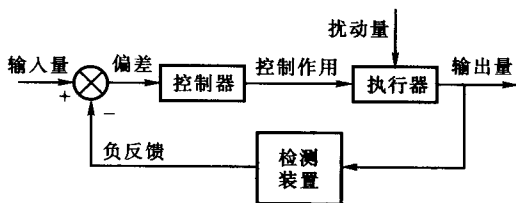


图 1.5 闭环控制系统示意图

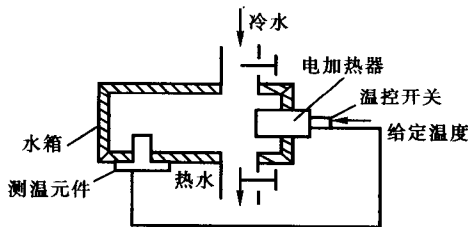
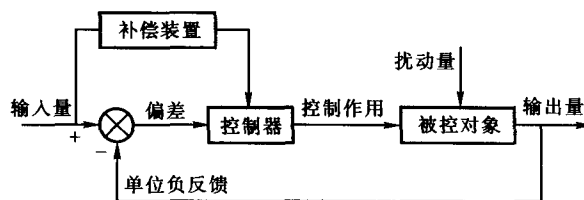


图 1.6 电加热器系统

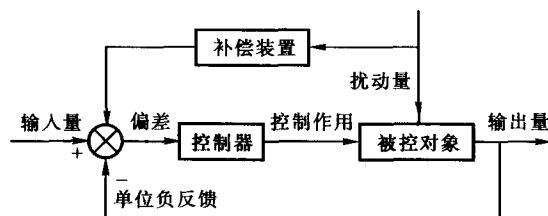
采用负反馈控制,可以有效地抑制前向通道中各种扰动对系统输出量的影响。假设输入量为一给定值,而外加扰动量使输出量减小,由于输入量未变,因而误差就会增大,控制器的控制作用也相应地增大,从而提高了输出量,这就对因扰动而引起的输出量的减小起到了自动调节的作用,反之亦然。所以带有负反馈的闭环控制又称为偏差控制,它能够提高系统的抗扰动性能,增强鲁棒性,改善系统的稳态精度。另一方面,由于负反馈的存在,对应于一定输出量的输入量必然加大,因此在到达稳态之前的动态过程中,施加于控制器的信号比较大,产生所谓的强激作用。控制作用增大了,被控对象的输出量对于输入量的跟踪速度也会增大,由此可见闭环系统还具有提高响应速度的优势。然而闭环控制也给系统带来新的问题,负反馈虽然能起到校正误差的作用,但由于系统一般都存在惯性,控制作用产生的效果将延迟一段时间,所以并不能及时校正系统误差。如果控制系统的强激作用与被控对象的惯性匹配不当,闭环系统还可能产生振荡,造成不稳定,使系统不能正常运行。

1.2.3 复合控制系统

当生产机构对自动控制系统提出很高的控制要求时,单独采用开环控制或闭环控制时有困难。这时,可以设计一种开环控制和闭环控制相结合的复合控制系统,如图 1.7 所示。在这种系统中,带有负反馈的闭环控制起主要的调节作用,而带有前馈的开环控制则起辅助作用,这样就能使系统达到很高的控制精度。图 1.8 所示电动机速度复合控制系统就是按扰动作用补偿的复合控制系



(a) 按输入作用补偿



(b) 按扰动作用补偿

图 1.7 复合控制示意图

统。负载大小的改变引起转速变化,反映在图 1.8(b)中即为负载转矩 M_e 的改变。

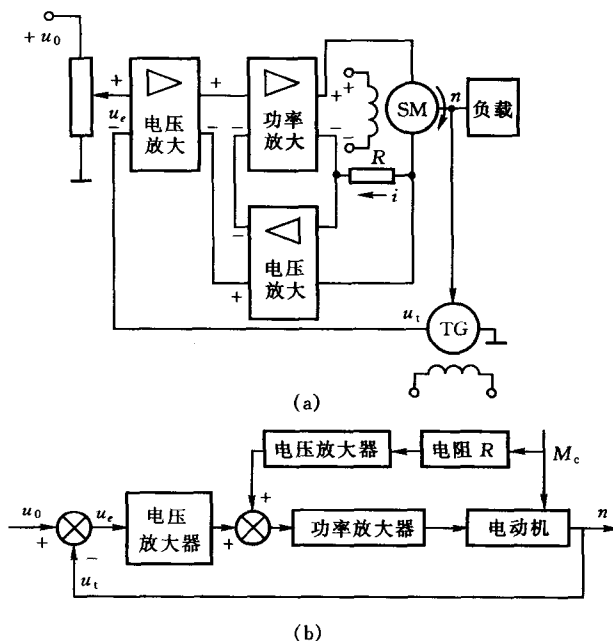


图 1.8 电动机速度复合控制系统

1.3 自动控制系统的基本类型

在自动化领域中,自动控制系统指的是带负反馈的闭环控制系统,因而反馈控制原理也就成为自动控制技术中的一个基本原理。控制系统分类方法很多,一般分为五大类。

1.3.1 调节系统和随动系统

如图 1.5 所示系统的输入量是恒定不变的。称这样的系统为恒值调节系统,简称恒值系统或调节系统。因为图中的输入量并非被控对象的实际输入,而是希望输出能够达到输入的期望值,所以称其为参考输入。

图 1.9 就是一个电动机转速恒值调节系统。其中测速发电机将检测到的实际转速转换成电压反馈到输入端,通过运算放大器与参考输入(给定转速的电压当量)进行比较,取其偏差进行控制。图 1.6 所示的电加热系统是一个温度恒值

调节系统。日常生活中还有许多如压力、水位、流量以及电压、电流等参量的恒值调节系统。

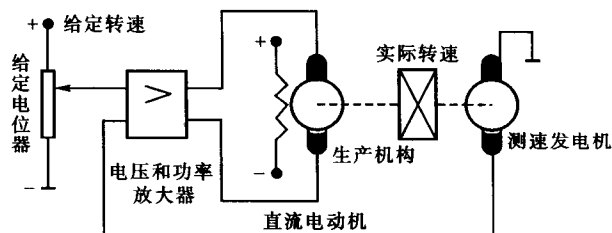


图 1.9 电动机转速恒值调节系统

另一类闭环控制系统称为随动系统，这种控制系统的任务是首先要保证系统输出量的变化能够紧紧跟随其输入变化，并要求具有一定的跟随精度。特别要指出的是，在这种系统中，输入量的变化往往是任意的，是不能预先知道的。如图 1.10 所示的火炮跟踪系统就是一例。

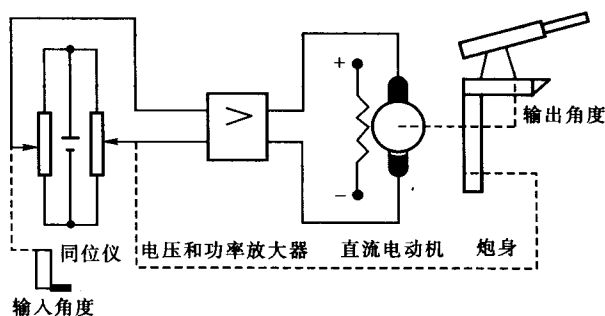


图 1.10 火炮跟踪系统示意图

在此系统中，当输入信号给定一个角度时，同位仪检测装置发出一个误差信号，放大装置便有一个相应的输出信号，使直流电动机带动火炮的炮架转动；与此同时，反馈装置又把炮架转动的角度送入同位仪检测装置，如此直至反馈角度的信号与输入角度的信号相等时，误差信号以及放大装置的输出功率均为零，电动机停止转动，则火炮炮架也就被控制转动到了给定的角度。由于火炮的目标是飞行物体，其空中位置是随时改变的，因此系统的给定角度必须根据实际目标方位随时调整，所以火炮跟踪系统是一个随动系统。

1.3.2 连续系统和离散系统

所谓连续系统，是指组成系统的各个环节的输入信号和输出信号都是时间

的连续信号。上面所举的恒值调节系统和随动系统的例子都属于连续控制系统。一般采用微分方程作为分析连续系统的数学工具。如果控制系统各个环节的输入输出信号都是离散信号,则属于离散控制系统。离散信号有两种:脉冲信号和数字信号。离散系统的动态性能一般要用差分方程来描述和分析。如果控制系统中既有连续信号又有离散信号,则称之为采样(离散)控制系统。图 1.11 所示电阻炉温度微机控制系统就是一个采样控制系统。其中 A/D、D/A 转换器和单片机之间传递的是数字信号。在有些控制系统中,连续与离散信号的转换采用 V/F、F/V 变换器,那么它们与单片机之间传递的是脉冲信号。

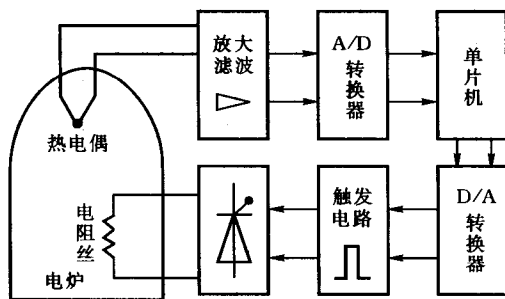


图 1.11 电阻炉温度微机控制系统

微机控制系统的结构框图可以用图 1.12 来表示。虚线框内部为数字控制器。其中参考输入可以预先存储于计算机中,这种方法通常称为内给定,图中所示为外给定方式。

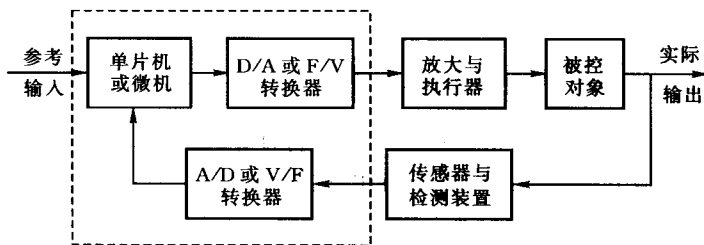


图 1.12 微机控制系统示意图

1.3.3 单输入单输出系统和多输入多输出系统

单输入单输出(single input and single output, SISO)系统是指只有一个输入量和一个输出量的控制系统。分析这种系统的方法有时域法和频域法。对比较简单的 SISO 系统,可用低阶微分方程(或差分方程)来描述,靠手算分析这种

系统是有可能的,这就是最初的时域法。对较为复杂的 SISO 系统,必须用高阶微分(动态)方程来描述,手工运算将是十分麻烦的。因此,20 世纪 40 年代前后在控制理论中出现了以传递函数为基础的频域法和根轨迹法,这些方法是经典控制理论的内容,至今仍广泛用于 SISO 控制系统中。我们前面提到的控制系统示例都属于 SISO 控制系统。

20 世纪 60 年代之后,由于工业过程控制和空间宇航技术的发展,控制系统逐渐复杂起来,出现了多信号、多回路、多变量且相互之间还有关联(耦合)的所谓多输入多输出系统,又称多变量(MIMO)系统。MIMO 系统不再局限于只研究其输入输出特性,而是从整个系统出发,研究其内部状态的运动规律以及相互之间的关系,这种系统对控制性能的要求也比较高,常常要求系统能在一定的控制约束和某种性能指标下实现最优控制。经典控制理论难以胜任对 MIMO 系统的研究,于是在控制理论中逐渐形成了以状态空间为基础的“现代控制理论”。MIMO 系统示意框图如图 1.13 所示。

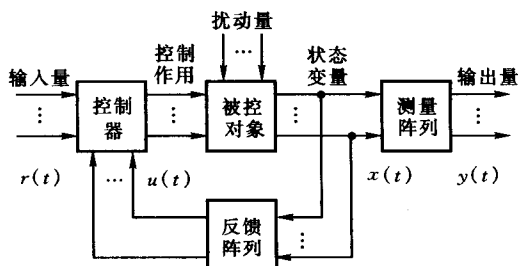


图 1.13 多变量系统示意图

1.3.4 线性系统和非线性系统

如果在动态系统中,各环节的输入输出特性是线性的,那么系统的性能可以用线性常系数微分(或差分)方程来描述,例如

$$\ddot{y}(t) + a\dot{y}(t) + by(t) = cr(t)$$

所描述的系统,因其数学模型是线性常微分方程,所以称为线性定常系统(或者叫线性时不变系统);如果描述系统性能的线性方程中的系数是随时间变化的,例如

$$\ddot{y}(t) + a(t)\dot{y}(t) + b(t)y(t) = c(t)r(t)$$

则称该系统为线性时变系统。例如运载火箭的燃料消耗,它的质量和惯性均随时间变化,这类系统就是时变系统。

线性系统的主要特点是,可以应用叠加和齐次性原理来处理输入输出之间的关系,例如两个输入同时作用于系统时,可以分别令一个输入为零,分析另一

个输入单独作用的影响,然后把两个独立作用的系统响应加起来就是完整的结果。以传递函数为基础的经典控制理论主要适用于线性定常控制系统的研究。

在动态系统中,只要有一个元器件的输入输出特性是非线性的,就称为非线性系统,用非线性微分(或差分)方程来描述,例如

$$\ddot{y}(t) + y(t)\dot{y}(t) + y^2(t) = r(t)$$

其特点是系统结构参数(非线性方程的系数)与输入输出变量有关,这种系统不适用叠加和齐次性原理。

严格地说,各种物理系统总是有不同程度的非线性,根据非线性程度的不同,可以分为本质非线性和非本质非线性。非本质非线性系统可以在其工作点附近的小邻域内进行线性化处理,也就是说系统变量在工作点的定义域范围内处处连续可微,而本质非线性则存在间断点。图 1.14 中只有图(a)属于非本质非线性特性,图(d)中实线和虚线分别表示两种不同的本质非线性。对于非本质非线性系统用小邻域线性化的办法进行处理后,视其为线性系统来分析和设计,但是对于本质非线性系统则需要专门的处理方法,例如描述函数法和相平面法等,目前较实用并有效的模糊控制就是专门针对系统非线性特性的分析与控制的方法。总的来说非线性系统的控制还存在相当大的困难,控制方法也在不断发展。

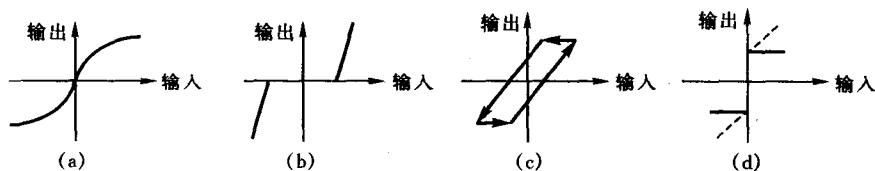


图 1.14 常见的非线性系统特性

1.3.5 其它类型

如果被控对象数学模型的结构和参数都是确定的,系统的全部输入信号又均为时间的确定函数,那么系统的输出响应也是确定的,这种系统就称为确定性系统。如果被控对象是确定的,但是系统的信号中含有随机量,如负载的随机变化,电源的随机波动,模型和测量噪声的影响等等,就称这种系统为随机系统。因为随机信号及其响应只具有数学统计特性,所以对于随机系统要应用概率统计理论加以研究。如果被控对象本身是不确定的,那么就需要不断地提取这种随机系统在运行过程中的输入输出信息,从中识别对象的模型参数,并不断修改控制器的参数,以适应系统的随机特性并维持系统的最佳运行状态,这就是现代控制理论中的模型辨识和现代控制工程中的自适应控制系统。

上述系统参数一般都被认为是集中参数。有些系统的参数不能用集中参数来表示,如电力传输系统的线路阻抗就必须按分布参数来处理,因此根据参数的分布特性,系统又可分为集中参数系统和分布参数系统。

1.4 对控制系统的要求和本书内容简介

对控制系统的要求可以概括为良好的稳定性能、动态性能和稳态性能三个方面。稳定是控制系统能够正常工作的基本前提,而动态品质和稳态精度则是对控制系统动、静态性能优劣的评价。在单输入单输出控制系统中,动态品质指的是系统输出响应的快速性和超调量,而稳态精度则常用输出响应的稳态误差的大小来衡量。

设计控制系统时,必须满足它的动、静态性能指标的要求,但是两者之间常有矛盾:稳态精度很高的系统容易导致动态品质恶化,甚至不稳定,动态性能好的系统有可能达不到高稳态精度的要求。为了解决这个矛盾就必须合理地设计控制器,对系统性能进行综合校正,这正是控制系统设计的核心内容。

控制系统设计的一般步骤如图 1.15 所示。自动控制理论课程对控制系统的研究基本上分为系统分析和系统综合两大部分。所谓系统分析,就是在给定系统的条件下,将物理系统抽象成数学模型,然后用已经成熟的数学方法和计算机对系统进行动、静态性能的定性或定量分析;所谓综合,就是在已知被控对象和给定性能指标的前提下,寻求合适的控制规律和设计校正模型,建立能使被控对象满足性能要求的控制系统。因此,建立数学模型、系统性能分析和控制器的设计是“自动控制理论”所要研究的三个基本问题。

本书主要介绍线性定常系统的建模、分析和设计方法,不涉及非线性系统。第 2 章介绍分析和设计的基础——数学模型,主要介绍控制工程中常用的数学模型的建立、种类及其相互之间的转换等。第 3 章通过求解线性系统的时域响应,主要介绍系统时域性能的分析与确定方法,包括稳定性的判断和动、静态性能指标的确定。第 4 章为根轨迹法,是分析线性系统的一种独特而有效的方法。第 5 章介绍线性系统的频域分析方法。第 6 章介绍线性系统的综合与校正方法。以上方法均属于经典控制理论的内容。第 7 章介绍离散控制系统的建模、分析和数字控制器的设计。第 8 章介绍现代控制理论的基础知识,主要侧重于介绍多变量系统的建模、定性分析和简单校正方法。

自动控制理论属于技术基础理论课程,其直接作为后续专业课程的技术储备基础,同时也需要较扎实的前期知识储备,如线性代数、电路、模拟电子技术和数字电子技术以及信号与系统等。