

高等工科院校控制类课程系列化教材

自动控制原理

孙亮 杨鹏 主编

(修订版)

北京工业大学出版社



Automatic
Control

内 容 简 介

本书是为适应高等院校教学改革的需要而编写的控制类课程系列教材之一, 主要介绍经典控制理论的基础知识, 包括: 控制系统的数学模型、时域分析、根轨迹法、频率分析法、控制系统的校正方法、非线性系统分析, 以及采样控制系统分析基础。附录中介绍了采样系统的 ϵ 变换。

本书可作为高等院校信息控制类专业及其他工科相关专业的大学本科教材, 也可供其他相关专业的人员阅读参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

自动控制原理/孙亮, 杨鹏主编. —北京: 北京工业大学出版社, 2006.2 修订

ISBN 7-5639-0832-3

I. 自... II. ①孙... ②杨... III. 自动控制理论 IV. TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 33534 号

自动控制原理

孙 亮 杨 鹏 主 编

*

北京工业大学出版社出版发行

邮编: 100022 电话: (010)67392308

各地新华书店经销

徐水宏远印刷厂印刷

*

2006年2月第2版 2006年2月第1次印刷

787mm × 1092mm 16开本 24印张 563千字

ISBN 7-5639-0832-3/T·140

定价: 35.00元

修订版前言

目前,信息与控制学科迅速发展,特别是计算机技术、信息处理技术和智能控制技术发展迅猛、应用广泛,新知识、新技术不断涌现,因此在专业培养目标上要求学生要有宽广的知识面,较强的工程实践能力,并注重能力与素质的培养。高等院校课程的设置、知识结构、教材内容以及实验方法与教学手段等均需作相应的调整和改革,才能适应和满足高等院校对人才培养的需要。

为适应新时代科学技术的发展,更好地发挥高等院校在经济发展和人才培养中的作用,促进教育教学改革的深化,我们于1999年9月组织编写并出版了《自动控制原理》这本教材。

由于自动控制原理课程在我国高校经过50余年的教学实践已渐趋成熟,课程内容已逐渐规范,因此本教材内容的编写比较精练,重点突出。在近5年的教学实践中,使用者普遍认为,本教材比较适用于本科生的课堂教学与学生的自学。另外考虑到不同专业对控制理论教学中教学大纲与教学学时的不同需求,本教材可以满足不同学时的教学要求。更为重要的是,计算机辅助教学与计算机仿真技术的发展,大大补充了理论教学的不足。本教材使用的MATLAB语言教学实验设计,充分提高了计算机辅助教学的水平与学生仿真设计的能力。

本次教材修订,保持原教材主要章节内容基本不变,仅在部分章节上适量地将内容作了一些修改与补充,增补了部分习题,另外,对书中原有的错误作了订正。

教材主要内容简介如下。

第一章概述自动控制系统。

第二章突出强调参数模型的必要性以及参数模型的基本要素及其表达。要求学生在基本概念的基础上能够熟练地掌握传递函数、结构图和它们的一些变换关系。

在第三章中,传统教学内容基本保留。时域分析中的一些扩展知识没有编入,以体现教材内容的精简。

在第四章中,编入根轨迹作图的基本内容。关于根轨迹法的系统分析可以在系统校正一章中再予以加强与扩展。

第五章频率分析法为本教材的重点。由于信息控制学科的特点,信号与控制之间是不可分割的。对于控制类专业的学生来说,通过本章的学习,了解与掌握信号的频率域描述与系统的频率域分析,对于今后信息基础理论的学习与提高是大有益处的。

因此,在第五章中加强了从时间信号的傅里叶变换来定义控制系统频率特性的描述,加强了通过时频关系的对应性来使用频率分析法分析控制系统。对于信息控制学科中的时频变换基本关系的理解掌握与应用是极为重要的。

由于传统的有关等 M 圆、等 N 圆以及Nichols图线分析方法等内容在应用中逐渐减少因而没有编入。有关内容可以参阅其他教材。

第六章作为第四章的应用与扩展,编入了控制系统根轨迹法校正的基本内容与根轨

迹同伦法校正设计的新内容。作为频率校正的基本概念与基本方法，叙述了超前校正与滞后校正的应用设计方法。作为频率法校正的应用基础，讲述了参考模型法校正以及复合校正。反馈校正设计可以作为选讲内容来处理。本章是应用技术的重点，应着重保证学生对于系统设计的基本能力。

第七章为非线性系统分析，除了保证相平面法和描述函数法的经典教学内容之外，作为描述函数法的扩展应用，增加了非线性控制器分析与应用的内容。另外作为扩展应用，增加了 PWM 控制器和非线性输入控制器的应用内容。

第八章的内容在计算机的硬件技术与软件技术广泛应用的今天越来越重要。作为基础理论保留了传统内容。作为应用与实用知识的扩展，增加了附录中的 ϵ 变换与 ϵ 域脉冲传递函数的内容。由于控制系统微机化设计的要求，学生应该在基础理论教学的基础上具备系统校正设计的微机程序编制能力。

本教材适用于控制类专业本科生的课内教学，内容是按照 100 学时左右编写的。在讲授时，按照需要可以压缩为 90 学时、80 学时或者 72 学时来讲授。对于非控制专业的少学时授课，也可以以选讲方式完成。

配合本课程的理论教学，另外编写了 MATLAB 语言与 SIMULINK 仿真设计的实验教材《MATLAB 语言与控制系统仿真》。通过 MATLAB 语言仿真实验平台，使得过去在理论教学和模拟仿真器实验中难以实现的，以及不能展现的许多复杂情况，可以轻松得到正确的结果。本课程的实验学时可以根据总学时的要求，在 4~16 学时（2 学时/个）之间灵活安排。

本教材的第一章，由河北工业大学王书田教授主笔，第四章，由河北工业大学杨鹏副教授主笔，第二、三、五、六、七、八各章，由北京工业大学孙亮副教授主笔。本次教材修订工作由北京工业大学孙亮副教授负责，另外，参与教材修订工作的还有于建均、陈梅莲等同志。

在本教材第 1 版使用的 5 年中，许多读者对本教材无论是书写风格、内容安排，还是例题图表，均提出了许多非常好的建议。教师与学生对于书中的错误也提出了宝贵的修改意见。另外本教材的出版与使用，得到了北京工业大学教材建设部门与北京工业大学出版社的大力支持。

值此教材修订之际，向那些在本教材的各项工作中提供各方面帮助的各界人士表示衷心的感谢。

本教材的此次修订，仍然不会十全十美。对于编写工作中的不足之处及书中的错误，敬请同行专家不吝指教，并期待专家的批评与建议。

编者

目 录

第一章 自动控制系统概述	1
1-1 引言.....	1
1-2 开环控制与闭环控制.....	1
1-3 自动控制与自动控制系统.....	3
1-4 自动控制理论的发展.....	7
思考题.....	9
第二章 控制系统的数学描述方法	10
2-1 控制系统的微分方程.....	11
2-2 非线性微分方程的线性化.....	16
2-3 拉普拉斯变换及其应用.....	19
2-4 传递函数.....	31
2-5 动态结构图.....	42
2-6 一般反馈控制系统.....	50
思考题.....	54
习题.....	55
第三章 控制系统的时域分析	59
3-1 时域分析的一般方法.....	59
3-2 一阶系统分析.....	64
3-3 二阶系统分析.....	68
3-4 高阶系统分析.....	86
3-5 控制系统的稳定性分析.....	89
3-6 控制系统的稳态误差分析.....	99
思考题.....	113
习题.....	114
第四章 根轨迹法	117
4-1 根轨迹法的基本概念.....	117
4-2 绘制根轨迹图的基本法则.....	120
4-3 控制系统根轨迹的绘制.....	130
4-4 控制系统的根轨迹法分析.....	143
思考题.....	146
习题.....	147
第五章 频率分析法	150
5-1 频率特性.....	150
5-2 典型环节的频率特性.....	157

5-3 控制系统开环频率特性作图	165
5-4 频域稳定性判据	173
5-5 闭环频率特性分析	185
5-6 开环频率特性分析	189
思考题	197
习题	198
第六章 控制系统的校正方法	202
6-1 系统校正基础	202
6-2 根轨迹法校正	204
6-3 频率法校正	223
6-4 参考模型法校正	231
6-5 频率法反馈校正	241
6-6 控制系统的结构设计(复合校正方法)	247
思考题	254
习题	255
第七章 非线性控制系统分析	259
7-1 控制系统的非线性特性	259
7-2 相平面分析法	262
7-3 描述函数法	277
7-4 非线性控制器及其应用	286
思考题	299
习题	299
第八章 采样控制系统分析基础	303
8-1 信号的采样与采样定理	303
8-2 信号复现与零阶保持器	308
8-3 采样信号的 z 变换	311
8-4 脉冲传递函数	326
8-5 采样系统的性能与控制	335
思考题	354
习题	355
附录 I 采样信号的 ε 变换	359
附录 II 部分习题参考答案	368
参考文献	374

第一章 自动控制系统概述

1-1 引言

从20世纪40年代起，特别是第二次世界大战以来，由于工业活动的发展和军事技术上的需要，科学技术的发展十分迅速。自动控制作为一个专门学科，也得到了迅速的发展和广泛的应用。

自动控制，就是在没有人参与的情况下，通过控制器或者控制装置来控制机器或者设备等物理装置，使得机器设备的受控物理量按照希望的规律变化，达到控制的目的。

自动控制技术不仅广泛应用于工业控制中，而且在军事、农业、航空、航海、核能利用等领域也发挥着重要作用。例如在工业控制中，对压力、温度、流量、湿度、配料比等的控制，都广泛采用了自动控制技术。对于高温、高压、剧毒等对身体健康危害很大的场合，自动控制更是必不可少的。在军事和空间技术方面，如宇宙飞船准确地飞行和返回地面、人造卫星按预定轨道飞行、导弹准确地击中目标等，自动控制更具有十分重要的意义。

“自动控制原理”是信息控制学科的基础理论，是一门理论性较强的工程科学。本课程的主要任务是研究与讨论控制系统的一般规律，从而设计出合理的自动控制系统，满足工农业生产和各种工程上的需要。

自动控制理论的发展与应用，不仅改善了劳动条件，把人类从繁重的体力劳动中解放出来，而且由于自动控制系统能以某种最佳方式运行，因此可以提高劳动生产率，提高产品质量，节约能源，降低成本。自动控制理论的应用是实现工业、农业、国防等领域科学技术现代化的有利工具。自本学科创建以来，自动控制理论得到了充分的发展，并且必将在未来得到更为广泛的应用。

1-2 开环控制与闭环控制

系统的定义十分广泛。在自动控制领域，系统指由内部互相联系的部件按照一定规律组成，能够完成一定功能的有机整体。

开环控制和闭环控制是控制系统的两种最基本的形式，如图1-1中(a)(b)两图所示。

开环控制是最简单的一种控制方式。它的特点是，控制量与输出量之间仅有前向通路，而没有反馈通路。也就是说，输出量不能对控制量产生影响。由于开环控制系统结构简单、维护容易、成本低、不存在稳定性问题，因此应用于许多控制设备中。

开环控制系统的缺点是：控制精度取决于组成系统的元件的精度，因此对元器件的要求比较高。由于输出量不能反馈回来影响控制量，所以输出量受扰动信号的影响比较大，系统抗干扰能力差。根据上述特点，开环控制方式仅适用于输入量已知、控制精度

要求不高、扰动作用不大的情况。

开环控制系统一般是根据经验来设计的。如普通的洗衣机，对输出信号即衣服的洁净度不作监测；普通电烤箱，不考虑开门时的扰动对于烤箱温度的影响等，所以系统只有一条从输入到输出的前向通路。

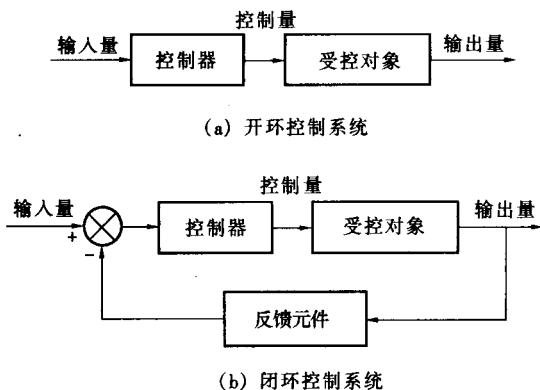


图 1-1 开环系统控制与闭环控制系统

上述系统的输出量通过测量变送元件返回到系统的输入端，并和系统的输入量作比较的过程就称为反馈。如果输入量和反馈量相减则称为负反馈；反之，若二者相加，则称为正反馈。控制系统中一般采用负反馈方式。输入量与反馈量之差称为偏差信号。

闭环控制系统在控制上具有以下特点。

由于输出信号的反馈量与给定信号作比较产生偏差信号，利用偏差信号实现对输出量的控制或者调节，所以系统的输出量能够自动地跟踪给定量，减小跟踪误差，提高控制精度，抑制扰动信号的影响。除此之外，负反馈构成的闭环控制系统还有其他的优点：引进反馈通路后，使得系统对前向通路中元件参数的变化不灵敏，从而系统对于前向通路中元件的精度要求不高；反馈作用，还可以使得整个系统对于某些非线性影响不灵敏等等。下面来举例说明开环控制和闭环控制。

图 1-2 是直流电动机转速开环控制示意图。图 1-3 是直流电动机转速闭环控制示意图。在图 1-2 中，电动机带动负载以一定的转速转动。当调节电位器的滑臂位置时，可以改变功率放大器的输入电压，从而改变电动机的电枢电压，最终改变电动机的转速。所以，电动机的转速可以由调节电位器来给定。但是当电动机受到负载变化影响时，电动机的转速是要发生变化的。

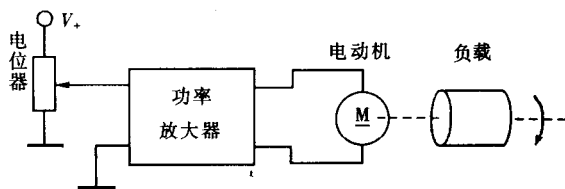


图 1-2 直流电动机转速开环控制

在这个系统中，电位器滑臂的分压值是系统的输入量，放大器作为控制器，电动机是受控对象，电动机的转速是系统的输出量。当外界有扰动时，即使输入量没有变化，输出量也会改变。这种开环控制系统的输出转速在负载扰动影响下不可能稳定在希望的数值上，所以开环控制系统不能做到自动调节，控制的精度是比较低的。为了实现系统

的自动控制，提高控制精度，可以改变控制方法，增加反馈回路来构成闭环控制系统。

在图 1-3 中，在原来开环控制的基础上，增加了一个由测速发电机构成的反馈回路，检测输出转速的变化并作反馈。由于测速发电机的反馈电压大小与发电机的转速成正比，反馈电压与输入值（电位器滑臂的分压值）作差值运算后，再经过控制器（功率放大器）来控制电动机的转速，可以实现电动机转速的自动调节。系统自动调节电动机转速的过程如下。

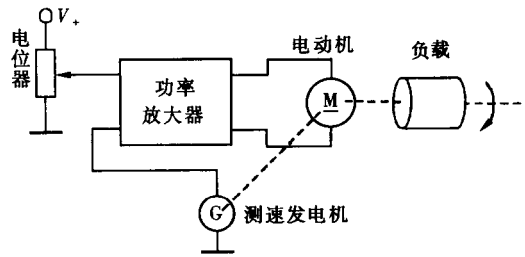


图 1-3 直流电动机转速闭环控制

当系统受到负载扰动作用时，如果负载增大，则电动机的转速降低，测速发电机的端电压减小，功率放大器的输入电压增加，电动机的电枢电压上升，使得电动机的转速增加。如果负载减小，则电动机转速调节的过程与上述过程相反。这样，消除或者抑制了负载扰动对于电动机转速的影响，提高了系统的控制精度。

综上所述，闭环控制系统的自动控制或者自动调节作用是基于输出信号的负反馈作用而产生的，所以经典控制理论的主要研究对象是负反馈的闭环控制系统，研究目的是得到它的一般规律，从而可以设计出符合设计要求的，满足实际需要的，性能指标优良的控制系统。

1-3 自动控制与自动控制系统

1-3-1 自动控制系统的组成及定义

自动控制系统的基本结构如图 1-4 所示。下面以图为例来介绍自动控制系统的组成部分以及一些常用术语。

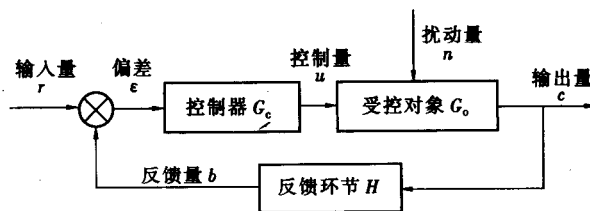


图 1-4 自动控制系统的方框图

1. 控制系统的一些常用术语

(1) 受控对象 是指被控制的装置或者设备（如电动机、车床等），有时也指受控的物理量。受控物理量的变化过程称为受控过程。例如化学反应过程、水泥窑炉的生产过程等。一般用符号 G_o 表示。

(2) 参考输入(设定值) 系统的给定输入信号,或者称为希望值,一般用符号 r 表示。

(3) 控制量 施加给受控对象的信号,使受控对象按照一定的规律运行,一般用符号 u 表示。

(4) 输出量 控制系统的输出,即受控的物理量,一般用符号 c 表示。

(5) 偏差信号 系统的参考输入信号与反馈信号之差称为偏差,是控制系统中的一个重要参数,一般用符号 e 表示。

(6) 扰动信号 外界或者系统内部影响系统输出的干扰信号。外部的扰动称为外扰,它是系统的一个输入量。内部的扰动称为内扰,也可以等价为系统的一个输入量。在设计控制系统时要采取一定的方法来减少或者消除它的影响。一般用符号 n 表示。

(7) 前向通路 从输入端到输出端的单方向通路。

(8) 反馈通路 从输出端到输入端的反方向通路。对于一个复杂系统,前向通路及反馈通路都不止一条。

2. 控制系统的组成

虽然实际当中的系统复杂多样,但是它们都是以典型的系统为基础的。一个典型的控制系统由以下几部分组成。

(1) 受控对象 (或者受控过程,其定义如前所述)

(2) 定值元件 在常规仪表控制中用它来产生参考输入或者设定值。设定值既可以由手动操作设定,也可以由自动装置给定。参考输入的值根据实际情况而定,其类型与变送器的类型相一致。在当前的计算机控制中,参考输入或者设定值一般可以由计算机给出,因此没有专用的定值元件。

(3) 控制器 接收偏差信号或者输入信号,通过一定的控制规律给出控制量,送到执行元件。如常规控制仪表(电动仪表、气动仪表)、可编程逻辑控制器(PLC)、工业控制计算机等都属于控制器。

(4) 执行元件 有时控制器的输出可以直接驱动受控对象。但是大多数情况下受控对象都是大功率级的,控制信号与受控对象功率级别不等。另外控制信号一般是电信号,而受控对象的输入信号多是其他形式的非电物理量,量的量纲不等。因此控制器的输出不能直接驱动受控对象。两者之间实现功率级别转换或者物理量纲转换的装置称为执行元件,又常称为执行机构或者执行器。常见的执行元件有步进电动机、电磁阀、气动阀、各种驱动装置等。在图 1-4 中是将其并入控制器中来考虑的,因此未能画出。

(5) 测量变送元件 又称传感器,用于检测受控对象的输出量,如温度、压力、流量、位置转速等非电物理量,并变换成标准信号(一般是电信号)后作为反馈量送到控制器。例如各种压力传感器、流量传感器、差压变送器、测速发电机等。

(6) 比较元件 用以产生偏差信号来形成控制,有的系统以标准装置的方式配以专用的比较器,大部分是以隐藏的方式合并在其他控制装置中,如计算机控制系统等。

1-3-2 自动控制系统的分类

自动控制系统的形式是多种多样的,按照不同的分类方法可以分成不同的类型。实际系统可能是几种方式的组合。

前面已经介绍过开环控制系统与闭环控制系统,这是按照控制原理来分类的。下面再介绍自动控制系统的另外几种主要分类方法。

1. 恒值控制系统与随动控制系统

这是根据给定的参考输入信号的不同来分类的。

当系统的参考输入为恒值或者波动范围很小时，系统的输出量也要求保持恒定，这类控制系统称为恒值控制系统。例如恒温控制系统和转速控制系统等。

随动控制系统又称伺服控制系统，其参考输入值不断地变化，而且变化规律未知。控制的目的是使得系统的输出量能够准确地跟踪输入量的变化。随动控制系统常用于军事上对于机动目标的跟踪，例如雷达跟踪系统、坦克炮塔自稳系统等。

2. 线性系统与非线性系统

这是根据系统数学性质的不同来分类的。

线性系统的主要特征是满足叠加原理，即：系统在输入信号 $u_1(t)$ 的作用下产生系统的输出 $y_1(t)$ ，系统在输入信号 $u_2(t)$ 的作用下产生系统的输出 $y_2(t)$ ，如果系统的输入信号为

$$au_1(t) + bu_2(t)$$

则系统的输出满足

$$ay_1(t) + by_2(t)$$

系数 a 、 b 可以是常数，也可以是时变参数。这样的系统称为线性系统，否则称为非线性系统。

由于线性系统的理论是比较成熟的。其中特别是线性定常系统，可以方便地用于系统的分析与设计，因此本书所研究和讨论的主要是线性定常系统。

3. 连续时间系统与离散时间系统

这是根据时间信号的不同方式来对系统进行分类的。当系统的输入信号与输出信号都是以连续时间函数 $u(t)$ 与 $y(t)$ 来表示时，称为连续时间系统。当系统的输入信号与输出信号均以离散时间量 $u(kT)$ 与 $y(kT)$ 来表示时，称为离散时间系统。注意，两种类型信号之间的等价是有条件的，因此两类系统之间的等价也是有条件的，两类时间信号如图1-5所示。

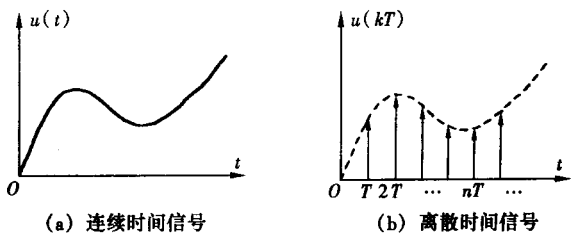


图 1-5 连续时间信号与离散时间信号

实际的离散时间系统是很少的。在数字化与计算机控制的当今时代，是将连续时间系统等价为离散时间系统来分析与研究的，这样就可以方便地利用计算机作为控制器来实现系统的控制了。计算机控制系统如图1-6所示。

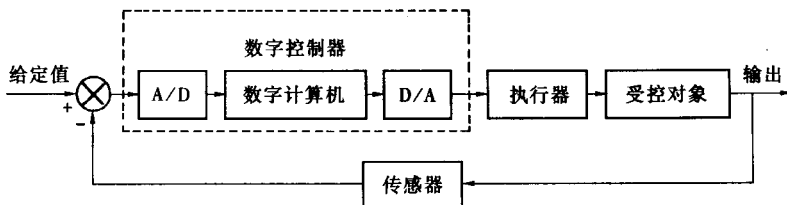


图 1-6 计算机控制系统

4. 单输入-单输出系统与多输入-多输出系统

单输入-单输出系统与多输入-多输出系统如图 1-7 (a) (b) 所示。

单输入-单输出 (SISO) 系统只有一个输入量和一个输出量。由于这种分类方法是从端口关系上来分类的, 故不考虑端口内部的通路与结构。单输入-单输出系统是经典控制理论的主要研究对象。

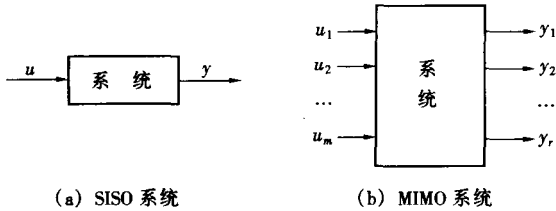


图 1-7 单输入-单输出系统与多输入-多输出系统

多输入-多输出 (MIMO) 系统有多个输入量和多个输出量, 其主要特点是输出与输入之间呈现多路耦合, 因之与单输入-单输出系统相比, 系统的结构要复杂得多, 本书基本不予讨论。

除了以上提到的分类方法外, 自动控制系统还有其他的分类方法, 如集中参数系统与分布参数系统、确定性系统与随机控制系统等。

1-3-3 自动控制系统的设计

自动控制系统的设计方法根据实际情况的不同而不同。首先自动控制系统的设计要符合自动控制系统的基本要求, 其次要遵循自动控制系统设计的基本原则。

1. 对自动控制系统的基本要求

对于一个控制系统首要的要求是系统的绝对稳定性。否则系统无法正常工作, 甚至可能导致设备毁坏, 造成重大损失。直流电动机的失磁、导弹发射的失控、运动机械的增幅振荡等都属于系统不稳定。

在系统稳定的前提之下, 要求系统的动态性能和稳态性能要好。系统的动态性能和稳态性能是由相应的性能指标来描述的, 这在后面的章节中再详细展开来叙述。在此, 对于系统的性能要求可以简要概括为: 响应动作要快、动态过程要平稳、跟踪值要准确。

上述三条自动控制系统的基本要求如图 1-8 所示。

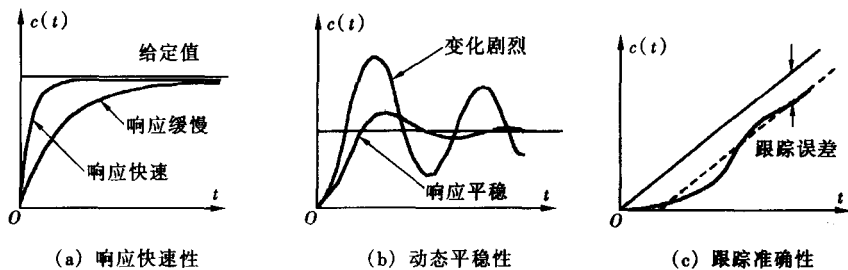


图 1-8 控制系统的基本要求

图(a)显示了给定恒值信号时, 系统达到稳态值的快速性。图(b)说明了给定恒值信号时, 系统的响应能够很快稳定在稳态值附近与在稳态值附近上下波动的两种比较情况。图(c)说明了跟踪等速率变化信号的系统, 系统的响应能否准确地跟踪输入信号。能够准

确地跟踪的系统,就没有跟踪误差或者跟踪误差很小,否则,跟踪误差就大。

上述的基本要求只是定性的描述。在设计一个控制系统或者考察一个控制系统时,上述三条均需要有定量的要求,也正是本门课程中系统分析与设计的任务。

2. 自动控制系统的的原则

自动控制系统设计的目的是要保证系统的输出在给定性能要求的基础上跟踪输入信号,并且要有一定的抗干扰能力。

由于对系统的要求不同,实际中系统的设计可能会复杂多样,但是自动控制系统的的设计大体上可以归结为以下几个步骤。

(1) 系统分析 首先要了解系统的工作原理,分析系统的性能。系统的分析是在描述系统的数学模型的基础上来进行的,利用系统的数学模型就可以将系统分析的工作转化为数学问题来研究与讨论。如何得到系统的数学模型,属于系统的建模问题,在本书中主要利用解析法,即基于物理学的定律来得到系统的数学模型。其他得到数学模型的方法还有实验法等。有了描述系统的数学模型,就可以用数学方法来具体分析一个自动控制系统了。

在系统分析中,利用各种系统分析方法可以得到系统的运动规律和系统的运动性能。采用什么分析方法来分析一个自动控制系统?如何来评价系统的性能?如何加以改进和修正?这些问题都是系统分析中需要解决的问题。

(2) 系统设计 系统设计的任务就是寻找一个能够实现所要求性能的自动控制系统。设计系统时,要找出影响系统性能的主要因素,确定控制量和被控制量。然后根据要求确定采取什么样的控制规律来改进系统的性能。例如比例控制、比例-微分-积分控制等。要确定和选用合理的控制装置例如控制器、执行器、工控机等。设计过程并不是一次就能够完成的,必须经过反复的选择和试探,才能达到满意的效果。

(3) 实验仿真 设计工作完成以后,可以利用计算机把数学模型在各种信号及扰动作用下的响应进行测试分析,确定所设计的系统性能是否符合要求,并且加以修正使其进一步完善,以寻求达到最佳的控制效果。

仿真的方法除了算法仿真之外,还有半物理仿真以及物理仿真。其中算法仿真的费用是最低的,而物理仿真的费用最高。可以根据实际需要来决定仿真实验选用什么样的方式。

(4) 控制实现 系统仿真工作完成之后,就可以进入样机制作阶段了。对于制作的样机,还要进行反复的实验调试,直至满足设计要求为止。

从上面叙述的设计步骤可以得出,一个自动控制系统的设计,是一个复杂和反复的过程。在本书中,重点从理论上探讨、研究自动控制系统的分析问题和系统的设计问题(自动控制系统的校正),其他问题只占很小的篇幅。

1-4 自动控制理论的发展

自动控制理论的发展到目前为止经历了以下几个阶段。

1-4-1 经典控制理论发展阶段

早在经典控制理论学科形成之前,反馈控制的思想,即应用负反馈来实现自动控制的系统已经在实际中得到了应用。图1-9所示我国古代的弓箭就是朴素的负反馈控制思想的早期

应用。早期工业应用的典型实例是 200 多年前蒸汽机的速度控制,如图 1-10 所示。

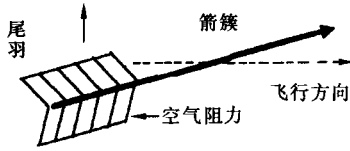


图 1-9 古代的负反馈应用

到了第二次世界大战时期,由于工业技术发展的需要和战争的需要,在其他相关学科发展的促进之下,经典控制理论逐渐发展成熟而形成独立学科。以奈奎斯特稳定性判据为核心的频率分析法和根轨迹分析法两大系统分析工具配之以数学解析方法的时域分析法,构成了经典控制理论的基础。在此期间,也产生了一些非线性系统的

分析方法,如相平面法和描述函数法等,以及采样系统的分析方法。

在此阶段较为突出的应用有高射炮随动跟踪系统、直流电动机调速系统,以及一些初期的过程控制系统等。

在经典控制理论的研究中,所使用的数学工具主要是线性微分方程和基于拉普拉斯变换的传递函数。研究对象基本是单输入-单输出系统,以线性定常系统为主,所以研究的对象和范围有限,还不能解决许多控制中的复杂问题,如时变参数问题,多变量、强耦合问题等。

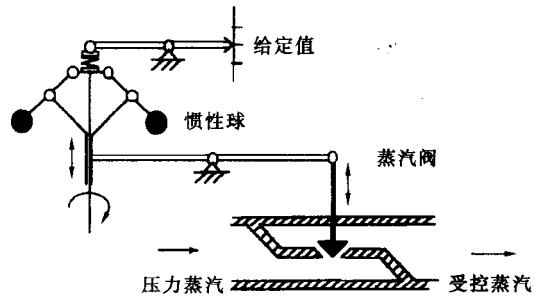


图 1-10 负反馈在早期机器中的应用

尽管如此,经典控制理论学科的形成,对于第二次世界大战以来控制学科

的发展起到了推动作用。经典控制理论在工业控制和军事技术中的广泛应用,推动了现代科学技术的进步,促进了现代控制理论的产生与发展,取得了不可磨灭的成就。

1-4-2 现代控制理论发展阶段

从 20 世纪 50 年代开始,为了适应空间技术与军事技术发展的需要,在经典控制理论充分发展的基础上,现代控制理论得到了长足的发展。许多经典控制理论不能解决的问题,在此期间都得到了满意的答案。

现代控制理论研究所使用的数学工具主要是状态空间法。研究对象更为广泛。如线性系统与非线性系统、定常系统与变时系统、多输入-多输出系统、强变量耦合系统等。

现代控制理论的发展和计算机硬件科学与软件科学的飞速发展是同步的,也是相辅相成的。前者的发展扩大了计算机科学的发展;借助于计算机技术,空间技术、导弹导航、船舶自动驾驶等高精技术领域进入了极为辉煌的时代。

我国在现代控制理论方面的主要成就除了航天方面的火箭发射控制技术之外,较为突出的还有人口模型与中国人口控制问题。这是人文社会科学与工程技术科学相结合的研究成果,该项研究成果协助我国政府实现了中国的短期、中期、长期人口控制发展决策,是一项突出的现代控制理论研究方面的研究成果。

1-4-3 智能控制理论研究阶段

智能控制理论的研究是建立在现代控制理论的发展和其他相关学科的发展基础之上

的。所谓智能，全称人工智能，是基于人脑的思维、推理决策功能而言的，早已超出了传统的工程技术的范畴，是当前控制理论学科研究的前沿领域。

早在几十年前，控制理论专家就提出了大系统理论和专家系统的概念。大系统理论提出了系统的复杂性与可控性之间的关系问题，即随着系统越来越复杂，系统就越来越难以控制。而专家系统则建立了基于知识来获得决策的模式。这些问题都促进了专家学者们进一步去探讨更深层次的控制问题。

智能控制理论的研究以人工智能的研究为方向，引导人们去探讨自然界更为深刻的运动机理。当前主要的研究方向有自适应控制理论研究、模糊控制理论研究、人工神经网络研究以及混沌理论研究等，并且有许多研究成果产生。不依赖于系统数学模型的自适应控制器、模糊控制器等工业控制产品已投入使用；超大规模集成电路芯片（VLSI）的神经网络计算机已经运行；美国宇航专家应用混沌控制理论，将一颗将要报废的人造卫星，仅利用其自身残存的燃料，成功地发射到了火星等等。

智能控制理论的研究与发展，在信息与控制学科研究中注入了蓬勃的生命力，启发与促进了人的思维方式，标志着信息与控制学科的发展远没有止境。

思 考 题

1. 什么是系统？什么是受控对象？什么是控制？
2. 什么是自动控制？自动控制对于人类活动有什么意义？
3. 什么是反馈？什么是负反馈？
4. 开环控制系统是怎样控制的？试举例来说明。
5. 闭环控制系统是怎样实现控制作用的？试举例来说明。
6. 自动控制系统主要是由哪几大部分组成的？各组成部分都有些什么功能？
7. 为什么说采用了输出信号的负反馈可以提高系统的精度？
8. 对于“引进负反馈可以降低对前向通路中元器件的精度要求”这句话怎么理解？
9. 对自动控制系统的基本要求是什么？试举例来说明。
10. 实际生活中，振荡现象是绝对不允许的吗？试举出希望维持等幅振荡的例子。
11. 实际生活中希望系统的运动都有些什么样的类型？举例说明。
12. 试叙述汽车驾驶时，驾驶员操纵方向盘时的闭环控制过程。
13. 试叙述电冰箱中温度控制系统的控制温度过程。
14. 试叙述在帆船驾驶中，驾驶员是如何联合控制风帆转角与舵角来实现保持航向不变的控制的。
15. 在跟踪飞机的飞行时，雷达的输入信号是什么样的信号？
16. 试叙述杂技节目“顶杆”的运动与控制过程。
17. 试叙述骑自行车时的闭环控制过程。
18. 家用电器中，有哪些是应用反馈控制原理来进行控制的？
19. 行走机器人可以模拟人的行走，试大致解剖人的行走控制过程。
20. 试大致叙述人在伸手取物时的运动与控制过程。

第二章 控制系统的数学描述方法

有许多类型的控制系统。如物理学中的力学系统，它是以牛顿力学为基础的机械运动系统。或者非物理学系统，如现代化企业管理系统。有工程技术方面的控制系统，如电动机转速控制系统，也有人文社科方面的控制系统，如中国的人口控制系统。本书主要以物理学系统为研究对象，来研究自动控制理论的基本问题。

一个物理系统，作为知识表达，首先要采用适当的描述方法来描述它。通常采用的方法是数学描述方法，或者称为数学模型。数学模型作为描述系统的专业语言，由于简洁、方便、通用等许多优点而得到广泛应用。

由上所述，在研究一个控制系统的时候，首先要建立该控制系统的数学模型。例如，在控制一个加热炉时，希望控制的物理量是加热炉的温度，而加热炉温度的变化是由控制加热源来决定的，两者之间运动关系的数学描述就称为该物理系统的数学模型。一旦得到了描述系统运动的数学模型，就可以采用数学分析的方法来研究该系统的运动规律了。

一般情况下，一个动力学系统的运动受到物理学基本定律的支配，可以表现为描述其因果关系的微分方程。如力学系统，可以由牛顿定律写出运动的微分方程。电学系统的微分方程，则可以由电压定律或者电流定律的约束来写出。通常所说的系统的运动，就是对系统施加控制——也就是输入控制信号，来得到系统输出变量随时间的变化规律——也就是系统的输出响应信号。系统运动的数学描述，就是在给定输入信号和初始条件下，求解微分方程而得到微分方程的解。这样，微分方程就是用于描述物理系统运动的一种数学模型。另外，基于拉普拉斯变换的传递函数和基于信号流通关系的动态结构图则是自动控制理论研究中更为常用的数学模型。

控制系统的微分方程可以通过解析法或者实验法获得。所谓解析法，就是依据描述系统运动规律的运动定律来得到微分方程的方法，这些运动定律以运动方程式确定了变量之间的约束，元件端口信号之间的约束等。而实验法，则是基于系统输入输出的实验数据来得到系统的微分方程。虽然为了便于分析与理解，在本章中主要讲述的是解析法，但实验法也是建立或者检验系统数学模型的一种重要手段。

控制系统的运动是复杂的，因此，微分方程的表现形式也是多样的。如线性的与非线性的，定常系数的与时变系数的，集中参数的与分布参数的等等。本书主要目的是讨论自动控制理论的基本问题，因此，以描述单输入-单输出线性定常系统的数学模型为主。关于非线性系统的研究，在本章中给出线性化的基本概念，另外在第七章中专门讲述非线性控制系统分析的基本方法。

研究控制系统数学模型的目的是为了得到系统的运动规律，这可以通过求解描述系统的运动方程，以时间解的方式来表现。另外，在许多情况下，例如线性定常系统，当它的数学模型一旦确定，其时间解也就随之确定了。也就是说，为了简化系统的分析，有时仅仅依赖于描述系统的运动方程就可以了。

2-1 控制系统的微分方程

线性定常系统的运动规律，一般是以时间 t 为自变量，采用线性常系数微分方程来描述的，可以表示为

$$\begin{aligned} & y^{(n)}(t) + a_{n-1}y^{(n-1)}(t) + \cdots + a_1\dot{y}(t) + a_0y(t) \\ & = b_mu^{(m)}(t) + b_{m-1}u^{(m-1)}(t) + \cdots + b_1\dot{u}(t) + b_0u(t), \quad n \geq m \end{aligned} \quad (2-1)$$

或者

$$\sum_{i=0}^n a_i y^{(i)}(t) = \sum_{j=0}^m b_j u^{(j)}(t), \quad n \geq m \quad (2-2)$$

式中， $y^{(i)}(t)$ ， $i = 0, 1, 2, \dots, n$ 为输出信号的各阶导数； a_i ， $i = 0, 1, 2, \dots, n-1$ 为输出信号各阶导数的常系数； $u^{(j)}(t)$ ， $j = 0, 1, 2, \dots, m$ 为输入信号的各阶导数； b_j ， $j = 0, 1, 2, \dots, m$ 为输入信号各阶导数的常系数。为了描述系统的可实现性，一般限定方程两边导数的阶次 $n \geq m$ 。

如上所述，线性定常系统的微分方程可以描述为输出信号各阶导数 $y^{(i)}(t)$ ， $i = 0, 1, 2, \dots, n$ 与输入信号各阶导数 $u^{(j)}(t)$ ， $j = 0, 1, 2, \dots, m$ 的线性组合。

线性定常系统有如下特征。

1. 线性可加性

满足叠加原理的系统称为线性系统。

设系统的输入为 $x_1(t)$ 时，系统的输出为 $y_1(t)$ ，系统的输入为 $x_2(t)$ 时，系统的输出为 $y_2(t)$ 。如果系统的输入为

$$x(t) = a \cdot x_1(t) + b \cdot x_2(t)$$

系统的输出保持线性可加

$$y(t) = a \cdot y_1(t) + b \cdot y_2(t) \quad (2-3)$$

则该系统称为线性系统。反之，不满足叠加原理的系统称为非线性系统。

2. 参数定常性

系统的参数，或者说元件的参数均为常数，则称为定常系统。如式(2-1)中的各参数 a_i ， b_j 等。否则，则称为时变系统(系统的参数为时间的函数)或者变系数系统。

采用解析法求取系统的运动方程时，一般的方法是根据物理系统的运动定律来列写。下面，以几种基本物理系统为例来说明如何求得描述系统运动的微分方程。

2-1-1 电学系统

在电学系统中，所需遵循的是元件约束和网络约束。在元件约束中，假定只考虑集中参数的线性约束。而对于网络约束，按照网络拓扑原理，可以采用许多种方法来得到运动方程，在此只考虑电网络的基本约束。

1. 元件约束

电路分析中的基本线性元件有三种，电阻 R 、电容 C 和电感 L ，它们的电压电流关系必须遵循广义欧姆定律，如图 2-1 所示。