

928061

高等学校教材

自动控制原理

(上)

黄家英

东南大学出版社

高等学校教材

自动控制原理

(上)

黄家英

东南大学出版社

内 容 提 要

本书根据“电子工业部工科电子类专业教材1986~1990年编审出版规划”，经“自动控制编委会”审定为准编教材。在教学改革实践的基础上，在编委会深入的指导下，本书在体系结构上把“经典控制理论”与“现代控制理论”有机结合起来，紧紧抓住控制系统这个中心，用统一的观点将各种方法组合在一起，从而避免了方法的分离和堆砌，增强了系统性。本书以工程应用为背景，全面地介绍自动控制的基本理论、基本概念和基本方法，并有实例分析贯穿始终。章后所附习题分为两档，A档为基本题，B档为拓展题，可根据教学的实际情况选择使用。这套统编教材的问世将为自动控制理论教学开辟新的前景。

责任编辑 陈天授 张 克

自动控制原理(上)

黄 家 英

东南大学出版社出版

南京四牌楼2号

江苏省新华书店发行 镇江前进印刷厂印刷

开本 850×1168毫米 1/32 印张 19 字数 475千

1991年5月第1版 1991年5月第1次印刷

印数：1—5000册

ISBN 7—81023—400—5

TP·28

定价：5.60元

出 版 说 明

根据国务院关于高等学校教材工作分工的规定，我部承担了全国高等学校、中等专业学校工科电子类专业教材的编审、出版的组织工作。由于各有关院校及参与编审工作的广大教师共同努力，有关出版社的紧密配合，从1978年至1985年，已编审、出版了两轮教材，正在陆续供给高等学校和中等专业学校教学使用。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应“三个面向”的需要，贯彻“努力提高教材质量，逐步实现教材多样化，增加不同品种、不同层次、不同学术观点、不同风格、不同改革试验的教材”的精神，我部所属的七个高等学校教材编审委员会和两个中等专业学校教材编审委员会，在总结前两轮教材工作的基础上，结合教育形势的发展和教学改革的需要，制订了1986~1990年的“七五”（第三轮）教材编审出版规划。列入规划的教材、实验教材、教学参考书等近400种选题。这批教材的评选推荐和编写工作由各编委会直接组织进行。

6AD-4102

这批教材的书稿，是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中经院校推荐，由编审委员会（小组）评选择优产生出来的。广大编审者、各编审委员会和有关出版社为保证教材的出版和提高教材的质量，作出了不懈的努力。

限于水平和经验，这批教材的编审、出版工作还会有缺点和不足之处，希望使用教材的单位，广大教师和同学积极提出批评建议，共同为不断提高工科电子类专业教材的质量而努力。

电子工业部教材办公室

前 言

本书系按电子工业部的工科电子类专业教材1986~1990年编辑出版规划,由高等学校《自动控制》专业教材编审委员会评选审定,并推荐出版。责任编委周其节教授,主审秦寿康教授。

本书的主要特点是采用新的体系,将“经典控制理论”与“现代控制理论”有机地结合在一起。针对自动控制系统所要解决的问题,以单变量线性定常系统为主要讨论对象,以零、极点方法和线性定常系统的基本特性贯穿始终。这样做既有利于系统地介绍自动控制的基本原理、基本概念和基本方法,又有利于从总体上介绍这两种方法体系的共性和各自的特点以及它们之间的联系,以便使读者加深对自动控制原理与各种方法的全面理解。《自动控制原理》课是自动化类专业的一门技术基础课,源于工程实际,服务于工程实际。因此,全书着重强调物理概念和工程观点,而把数学作为一种重要的手段。书中以位置随动控制系统和速度恒值控制系统作为典型实例,并加大习题的份量,设有基本题与拓展题两大类,使之成为学生知识开拓与能力培养的重要环节。

在内容组织上,本书以分析为主,综合为辅。在着重阐明线性定常系统的基础上,适当加强对离散系统 and 非线性系统基本内容的讨论。全书共分九章。第一章绪论,介绍自动控制系统的组成和基本原理以及初步概念,并通过对控制系统理论发展历史的回顾,阐明新体系结构的特点与依据。第二章控制系统的数学描述,讨论状态空间描述法与输入输出描述法,以及相应的控制系统两类数学模型的特点、表示方法以及它们之间的等价变换关系。第三至第六章为控制系统的分析部分。其中第三章时域分析,讨论在

任意输入信号作用下,系统时间响应特性的基本规律以及线性定常系统的稳定性;第四章(复域分析)和第五章(频域分析)主要介绍以传递函数为基础的,两种工程实用的分析方法;第六章线性系统结构的基本特性,讨论系统状态的能控性与能观测性,并通过线性系统状态空间结构的分解,阐明线性定常系统的基本特性以及两类数学描述方法和相应的两类模型之间的本质联系。第七章控制系统综合,介绍以极点配置为中心的常用综合方法。第八章和第九章,分别讨论线性离散系统 and 非线性控制系统。全书分上下两册,上册包括前五章。本教材适合于自动控制、工业自动化等自动化类专业使用。其参考学时数为150学时;若删去标有“*”号的内容学时数可减少到120;若要进一步压缩学时,可精简第六章和有关状态空间的内容,各校可根据具体需要适当取舍。

全国《自动控制》教材编委会、十分重视《自动控制原理》教材的改革和建设,把编写将“经典”与“现代”控制理论有机结合的新体系教材,作为工作的重点。以科学院学部委员张钟俊教授为首的专家们,对本书的新体系结构和编写大纲,给予了悉心指导和热情帮助,并多次组织研讨、反复推敲。在编写过程中还得到了全国控制界许多专家学者的热情支持和帮助。因此,这套新体系的教材,实际上是集体智慧的结晶。笔者十分感谢《自动控制》编委会和东南大学出版社,以及为本书问世而辛勤劳动的同志们。这里,特别要衷心感谢张钟俊教授、秦寿康教授、陈天授副教授、谢剑英副教授对书稿提出的宝贵意见和对本人的热情指导、支持和帮助。

由于时间匆促,加上笔者水平有限,书中的缺点和错误肯定不少,热忱欢迎批评指正。

黄家英

1990年7月

于成都科技大学

目 录

第一章 绪论 (1)

§1.1 自动控制系统的组成与基本原理..... (1)

1.1.1 开环控制系统..... (3)

1.1.2 闭环控制系统 (8)

1.1.3 复合控制系统 (13)

§1.2 自动控制系统的的主要类型 (23)

§1.3 自动控制理论的发展简史 (34)

习题..... (39)

第二章 控制系统的数学描述 (43)

§2.1 引言 (43)

§2.2 状态空间描述法 (45)

2.2.1 状态和状态空间 (49)

2.2.2 状态空间表达式 (50)

§2.3 输入输出描述法 (61)

2.3.1 零点和极点..... (65)

2.3.2 传递函数的基本性质..... (66)

2.3.3 典型环节及其传递函数..... (70)

*2.3.4 多变量系统的传递函数阵..... (86)

§2.4 数学模型图示法..... (91)

2.4.1 结构图..... (91)

2.4.2 信流图和梅森增益公式..... (106)

2.4.3 状态图..... (120)

§2.5 状态空间模型与输入输出模型之间的等价变换..... (128)

2.5.1 由状态空间模型变换为输入输出模型..... (129)

2.5.2 由输入输出模型变换为状态空间模型..... (130)

§ 2.6 非线性数学模型的线性化	147
• § 2.7 控制系统建模举例	(156)
2.7.1 电气系统	(157)
2.7.2 机械系统	(174)
2.7.3 液压系统	(182)
小结	(188)
习题	(190)
第三章 控制系统的时域分析	(205)
§ 3.1 引言	(205)
§ 3.2 线性系统的时间响应	(207)
3.2.1 输入输出描述时	(207)
3.2.2 状态空间描述时	(209)
§ 3.3 零输入响应	(211)
3.3.1 输入输出描述时	(211)
3.3.2 状态空间描述时	(216)
3.3.3 状态转移矩阵	(224)
§ 3.4 零状态响应	(235)
3.4.1 输入输出描述时	(236)
3.4.2 状态空间描述时	(241)
§ 3.5 控制系统的稳定性	(250)
3.5.1 稳定性定义	(251)
3.5.2 稳定性条件与结论	(254)
§ 3.6 劳思-赫尔维茨判据	(258)
3.6.1 劳思判据	(260)
3.6.2 劳思判据的应用	(266)
3.6.3 赫尔维茨判据	(268)
§ 3.7 线性化系统的稳定性	(270)
小结	(271)
习题	(272)

第四章 控制系统的复域分析 (282)

§ 4.1 引言	(282)
4.1.1 典型输入信号	(283)
4.1.2 微分特性	(286)
§ 4.2 低价系统的暂态响应	(288)
4.2.1 一阶系统的暂态响应	(288)
4.2.2 二阶系统的暂态响应	(291)
§ 4.3 控制系统的暂态性能指标	(302)
4.3.1 暂态性能指标体系	(303)
4.3.2 典型二阶系统的暂态性能指标	(304)
4.3.3 具有零点的二阶系统的暂态性能指标	(317)
4.3.4 抗扰动性能指标	(321)
§ 4.4 高阶系统的暂态响应	(328)
§ 4.5 控制系统的稳态误差	(340)
4.5.1 跟踪稳态误差	(341)
4.5.2 扰动稳态误差	(360)
§ 4.6 根轨迹法	(367)
4.6.1 基本原理	(371)
4.6.2 绘制方法	(373)
*4.6.3 补根轨迹	(398)
*4.6.4 根轨迹族	(407)
*4.6.5 时滞系统根轨迹	(413)
§ 4.7 根轨迹法在系统分析中的应用	(423)
4.7.1 系统特性分析	(423)
4.7.2 添加开环零、极点对根轨迹形状的影响	(429)
小结	(433)
习题	(433)

第五章 控制系统的频域分析 (451)

§ 5.1 频率特性	(451)
5.1.1 基本概念	(451)

5.1.2 表示方法.....	(456)
5.1.3 由零、极点分布确定系统的频率特性.....	(460)
§ 5.2 典型环节的频率特性.....	(461)
5.2.1 惯性和一阶微分环节.....	(461)
5.2.2 比例环节.....	(468)
5.2.3 积分和微分环节.....	(469)
5.2.4 振荡和二阶微分环节.....	(472)
5.2.5 时滞环节.....	(478)
§ 5.3 最小相位系统.....	(481)
§ 5.4 开环频率特性的绘制.....	(483)
5.4.1 开环幅相频率特性的绘制.....	(484)
5.4.2 开环对数频率特性的绘制.....	(493)
§ 5.5 奈奎斯特判据.....	(501)
5.5.1 幅角原理.....	(501)
5.5.2 奈奎斯特稳定判据.....	(503)
§ 5.6 根据开环频率特性分析闭环系统的特性.....	(528)
5.6.1 稳定裕量.....	(528)
5.6.2 开环对数频率特性的基本性质.....	(534)
5.6.3 闭环特性估算.....	(534)
§ 5.7 闭环频率特性.....	(547)
5.7.1 频域性能指标.....	(548)
5.7.2 闭环频率特性的绘制.....	(551)
5.7.3 闭环频率特性在系统分析中的应用.....	(561)
§ 5.8 传递函数实验测定法.....	(571)
小结.....	(578)
习题.....	(579)

第一章 绪 论

在生产力发展的过程中,人类总是不断地征服自然,提高劳动生产率。经过一个漫长的历史时期,逐步用机器代替人工劳动,实现机械化和自动化,开始了人类对生产活动有意识控制的新纪元。自动控制是科学技术发展到一定阶段的产物,是人类进步的一个象征。它集众多学科的成就,并渗透到社会生活的各个领域。自动控制理论的研究对象,不仅涉及传统的工程领域,而且也涉及社会、经济、环境、生态、生物医学等各个非工程领域。“系统”的概念已遍及社会生活的各个方面,从很小的一个细胞到规模很大的自动化工厂,以及全世界的生态系统等,都是不同类型的系统。自动控制理论就是研究各类控制系统共性的一门技术基础科学。因此,掌握和了解自动控制的基本理论与方法,不仅对从事自动化事业的科技人员是必需的,而且对从事其他学科的科技人员,以及管理人员也是有益的。本书以工程应用为背景,介绍自动控制的基本理论、基本概念和基本方法。

本章从实例出发,介绍自动控制系统的组成、基本原理和初步概念,回顾自动控制理论的发展历史,并对全书的结构体系作一简要说明。

§ 1.1 自动控制系统的组成与基本原理

控制系统的种类繁多,复杂程度亦各异。但就控制系统的外部结构而言,它们的共同特点是:若把系统视为一个整体,则它们都有输入量和输出量(如图 1-1 所示)。输入量是外界对系统作用

的信号。在输入量中,有些是人为设置对系统进行控制的,称为参考输入信号(或给定信号,有时简称为输入信号);有些是外部环境对系统的干扰,称为外部扰动量(或简称为扰动量),它们往往是难以预知和控制的。而输出量是系统向外界传送的信号,它们通常也是系统的被控量(或被调量)。实际系统是因果系统,即有输入才有输出,而输出决不会产生在输入作用时刻之前。或者说,系统只是在“激励”作用下才引起“响应”的。因此输入量又叫做系统的激励,输出量又叫做系统的响应。参考输入信号是使系统的响应朝着希望方向变化的。而扰动信号是干扰甚至破坏系统响应朝希望方向变化的。例如飞机控制系统,它的输入量是飞机舵的转角和发动机产生的推进力,它们的大小均可由驾驶员来控制。改变它们便可达到改变系统输出(飞行速度、飞行的方位和高度)的目的。而在飞行中遇到的由气流形成的阻力,将干扰飞机的航迹。这种阻力就是作用于飞机控制系统的扰动量。这个系统的特点是,输入量和输出量有若干个,通常称这种多个输入量多个输出量的系统为多变量控制系统。控制系统的另一种类型是只有一个输入量和一个输出量,通常称这类系统为单变量系统,它是工业系统中常见的基本类型,也是本书讨论的主要对象。

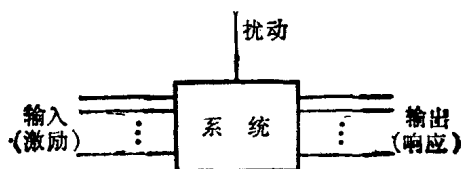


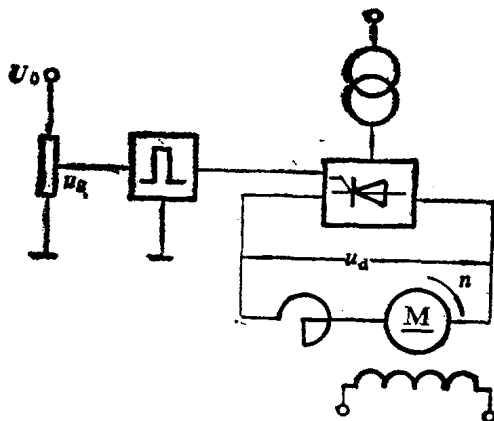
图 1-1 控制系统的外部结构

我们所研究的系统,都是自动控制的系统。所谓自动控制,是指,在没有人直接参与下,利用控制装置使受控对象的被控量,自动地按预先规定的规律变化。而自动控制系统(以下简称控制系统或系统)的内部结构,比起外部结构要复杂得多。但就基本的控

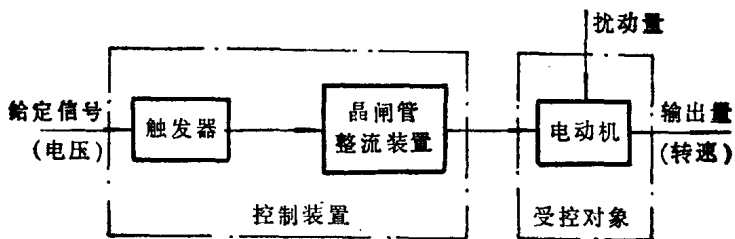
制方式而言,主要有下列三种类型:

1.1.1 开环控制系统

若系统的输出量不回送到系统的输入端,这类系统则叫做开环控制系统。图 1-2(a) 所示的直流电动机速度控制系统,就是其中的一例。



(a) 原理图



(b) 方块图

图 1-2 开环调速系统

在该系统中,受控对象(或称控制对象)是直流电动机,通过改变电动机电枢两端的电压,来达到调节电机转速的目的。因此电机转速是系统的输出量(即被控量)。改变给定电压 U_q 的大小,来改变触发器所产生的触发脉冲的相位,使得晶闸管整流装置的输

出电压(即电机电枢电压)改变,以调节电机转速的高低。因此给定电压 U_1 是系统的输入量(即给定信号)。电动机负载的改变以及电网电压的波动等,也是外界作用于系统的输入信号。但由于它们通常是使电机转速偏离希望值的,故为系统的扰动量。在功能上,晶闸管整流装置和触发器起着控制电动机(受控对象)转速的作用,通常把它们合在一起叫做系统的控制装置(或控制器)。

从这个简单控制系统的讨论中可以看到:① 自动控制理论所关心的是“控制”问题,即研究信号在系统中传递与变换的控制规律,以满足性能指标的要求,至于系统中的“能量”传递与变换问题,则是其它课程所要解决的;② 由于所要研究的是控制的共性问题,用文字叙述甚为不便。即使是上面所举的简单系统,花了不少笔墨,既令人感到乏味,又易使人不得要领。故通常是将控制系统抽象为数学方程来研究,并采用直观的图形描述。象图1-1所示的这一类图形叫做方块图,它的基本组成单元如图1-3所示。图中每一条线代表控制系统中的一个信号变量;信号的传递方向用箭头表示,在控制系统中,信号只能沿着箭头进行单方向传递;系统中具有一定功能的部分称为环节,用一方块来表示,在方块内标出该环节的名称(符号或特征);进入方块的信号称为该环节的输入量,离开方块的信号称为该环节的输出量(如图1-3(a)所示);用符号“ $\otimes$ ”表示信号的综合点,即对进入该综合点的信号进行运算,运算的结果由离开综合点的信号线往外传送(如图1-3(b)所示),常用的综合运算是相加(减),故这时的综合点又叫做相加点,为了简化表示,我们约定,凡送至相加点的信号是负的,必须以符号“(—)”加以标明,凡是正的,则不另加符号标志;图1-3(c)表示的是信号的引出点,进入或离开引出点的信号,均为同一信号。

若用方块图,则上述开环调速系统可简单地用图1-2(b)表示。可见,方块图形象地描述了系统的结构、信号的流向以及控制关系。若每个环节用它们的特性表示,建立环节的数学关系式,

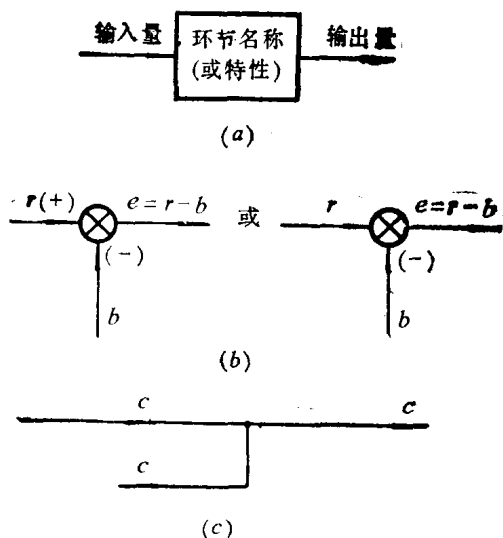
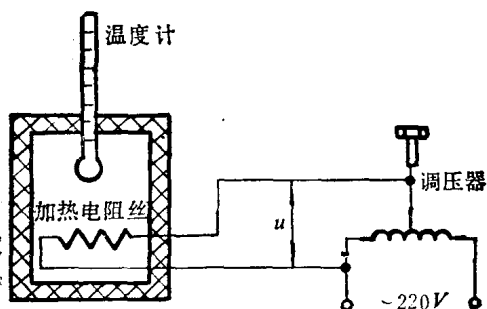


图 1-3 控制系统方块图的基本组成单元

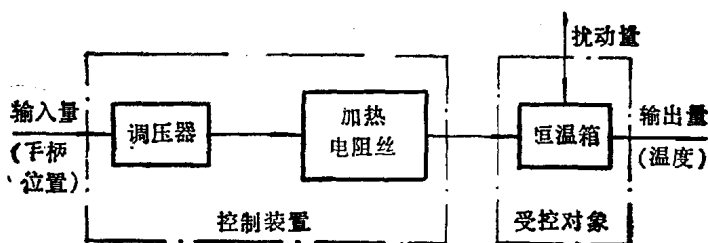
不仅定性而且定量地描述了系统的结构和控制关系，这种图则称为函数方块图，又叫做系统（或环节）的结构图（详见第二章）。这样，尽管实际系统的物理属性和所用的元、部件很不相同，但只要有相同的结构图就具有相同的控制特性。

图 1-4(a) 所示的是恒温箱的温度控制系统。恒温控制的任务是，在扰动因素（如打开箱门放入物品或取出物品，电源电压的波动以及环境温度的变化等）作用下，保持箱内温度恒定，以满足生产工艺对温度的要求。开环控制的方法是，移动调压器活动触头的位置，改变加在电阻两端的电压，从而调节电阻丝电流的大小，以达到控制温度的目的。若用方块图，则可简便地用图 1-4(b) 表示。

分析比较图 1-3(b) 和图 1-4(b) 可以看到，尽管实际系统不同，物理属性和所用的元、器件也各异，但两个开环控制系统的内



(a) 原理图



(b) 方块图

图 1-4 恒温箱的温度控制系统

部结构则相似。就功能而言，不外乎是由控制装置和受控对象这两部分所组成的，如图 1-5 所示。

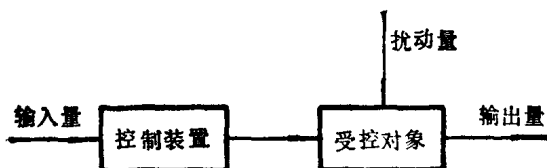


图 1-5 开环控制系统方块图