

# 工程控制论教程

曾昭磐 编著



## 内容简介

本书介绍工程控制论的主要理论,包括控制论的基本概念,控制系统的数学模型,控制系统分析,线性系统的能控性能观性理论,反馈控制系统设计,最优控制理论。本书的特点是:把经典控制理论与现代控制理论结合起来进行介绍,并注意介绍理论的应用;比较详细地介绍了最优控制理论的三种基本方法(变分法、最小值原理、动态规划)。书中选编了一定数量的习题,以帮助读者理解和运用基本理论。

本书可作为系统工程、自动控制类专业的教科书与教学参考书,也可供有关科技人员参考。

## 工程控制论教程

曾昭磐 编著

\*

厦门大学出版社出版发行

福建省新华书店经销

厦门大学印刷厂印刷

\*

开本 787×1092 1/32 12.25 印张 1 插页 245 千字  
1991年3月第1版 1991年3月第1次印刷

印数:1—1000册

ISBN 7—5615—0335—0/T·8

定价:3.20元

## 前 言

系统科学是一个新兴的科学技术部门。按照钱学森提出的现代科学技术体系结构,系统科学和其它科学技术部门一样,纵向可分为三个层次:(一)直接改造客观世界的工程技术,即系统工程;(二)为工程技术直接提供理论基础的技术科学,主要是信息论、控制论、运筹学、巨系统理论;(三)基础科学,即正在建立中的系统学(Systematology)。可见,控制论是系统工程的主要理论基础之一,它正为系统工程提供越来越多的理论与方法。另一方面,控制论揭示了“系统”的许多重要特征,为系统学提供了许多重要的概念、模型与方法,成为系统学的重要支柱。

工程控制论是控制论的一个发展最快、最成熟的分支。它是关于受控工程系统的分析、设计、运行的理论。它研究受控系统的结构、功能和行为之间的关系,以及系统状态的变化规律,着重研究对系统进行控制的可能性和系统的受控行为,即以何种方式控制系统的变化进程使之朝人们所期望的目标发展;同时研究采取何种控制方式才能使系统以最好的方式达到所期望的目标。它的理论与方法可以推广应用于非工程受控系统(如生物系统、经济系统、社会系统等),特别是用于社会经济系统的状态分析、模型提取、系统设计和优化决策,成为科学决策的一个重要工具。因此,

工程控制论就成为系统工程专门人才的重要必修课程。

本教程是为系统工程专业本科生编写的,主要介绍工程控制论的基本理论,包括控制系统建模,系统分析,能控性能观性理论,反馈控制理论,最优控制理论。由于教学时间的限制,本教程不能涉及工程控制论的重要分支 Kalman 滤波理论。

本教程曾在我校系统工程专业为本科生讲授过多次,且几经修改充实。出版之前,李文清教授仔细地审阅了书稿,提出许多宝贵意见。本教程编写过程中,得到贺建勋教授的热情指导和厦门大学计算机与系统科学系系统工程教研室一些同志的帮助。本教程的出版,还得到我校科研处的支持。对于这些帮助与支持,作者深致谢意。由于作者水平不高,书中定有不少不当之处,敬请读者提出宝贵意见,以作进一步修改。

作者 谨识

1990年8月于厦门大学

# 目 录

<b>第一章</b>	<b>引论</b> .....	(1)
§ 1	控制论的诞生和发展 .....	(1)
§ 2	控制论的基本概念 .....	(8)
§ 3	控制系统的质量指标 .....	(13)
§ 4	本课程的基本任务 .....	(16)
	习 题 .....	(17)
<b>第二章</b>	<b>控制系统的数学模型</b> .....	(19)
§ 1	数学模型 .....	(19)
§ 2	线性系统的外部描述 .....	(23)
§ 3	系统的内部描述 .....	(32)
§ 4	系统的状态空间模型的建立 例子 .....	(38)
§ 5	线性系统的内部描述与外部描述的关系 .....	(54)
	习 题 .....	(64)
<b>第三章</b>	<b>控制系统分析</b> .....	(67)
§ 1	状态方程的求解 .....	(67)
§ 2	定常线性系统的稳定性 非线性系统按 第一近似判断稳定性的准则 .....	(90)
§ 3	根轨迹法 .....	(91)
§ 4	频率特性法 .....	(110)
§ 5	系统的控制精度分析 .....	(134)

习 题	.....	(140)
<b>第四章 能控性与能观性</b>	.....	(145)
§ 1 线性系统的能控性	.....	(146)
§ 2 线性系统的能观性	.....	(158)
§ 3 对偶性原理	.....	(163)
§ 4 定常线性系统的标准结构	.....	(166)
§ 5 系统的传递矩阵和能控性、能观性 的关系	.....	(173)
§ 6 离散时间系统的能控性与能观性	.....	(185)
§ 7 例	.....	(193)
习 题	.....	(201)
<b>第五章 极点配置与观测器的设计</b>	.....	(204)
§ 1 线性控制系统的构成	.....	(204)
§ 2 状态反馈的极点配置	.....	(209)
§ 3 观测器的设计	.....	(220)
§ 4 降阶观测器的设计	.....	(226)
§ 5 带观测器的输出反馈系统	.....	(233)
习 题	.....	(239)
<b>第六章 最优控制的理论</b>	.....	(243)
§ 1 最优控制问题的实例	.....	(243)
§ 2 最优控制问题的一般形式	.....	(254)
§ 3 求解最优控制问题的变分方法	.....	(259)
§ 4 最小值原理及应用	.....	(293)
§ 5 最小时间问题与线性二次型问题	.....	(306)
§ 6 离散型最小值原理	.....	(327)

§ 7	动态规划及其应用 .....	(336)
§ 8	最优控制问题的数值计算方法 .....	(365)
	习 题 .....	(373)
附 录	Laplace 变换 .....	(376)
参 考 文 献	.....	(383)

# 第一章 引 论

## § 1 控制论的诞生和发展

1948年,美国数学家 Norbert Wiener 发表了《控制论》(Cybernetics)一书,创立了控制论这门学科。《控制论》有个副标题:“关于在动物和机器中控制和通讯的科学”,这就是维纳提出的控制论的定义。这定义表明:控制论冲破有生命的动物和无生命的机器截然区分的界限,揭示了二者存在的共同的控制和通讯的规律,并把它们概括在统一的理论之中,它是研究各种系统的共同控制规律的科学。

控制论是自动控制技术实践经验的结晶。人类在古代就尝试制造各种模仿人的控制行为的自动控制机器。我国在西汉初期(公元前一世纪左右)以前就出现的指南车,可能是世界上最早的控制论机械。俄国人巴祖诺夫发明的蒸汽锅炉水位调节器(公元 1765 年)和英国人瓦特发明的蒸汽机离心调速器(公元 1784 年)则是国外最早的自动控制装置。本世纪以来,电子技术、通讯技术的发展,促使自动控制技术有了长足的进步。控制技术实践经验的积累为揭示自动控制系统的运动规律创造了条件,伺服机理论随后就



建立起来了。这就为控制论的建立奠定了技术和理论基础。

控制论又是物理学、生物学、数学、生理学、神经生理学、医学、统计力学、通讯技术、计算机技术等多种学科相互交叉、渗透的产物。第二次世界大战前后,维纳曾经和一批科学家,包括物理学家、生理学家、医学家、数学家、通讯工程师、计算工程师等一起,举行科学方法和反馈问题等专题的讨论会。他们在讨论中逐渐认识到科学发展上可以得到最大收获的领域是已有的科学部门之间被忽视的“无人区”。维纳及时抓住当时刚露出端倪的各种科学部门相互交叉、渗透的科学发展的历史新潮流,通过多学科知识的交流和跨学科的研究,结合自己的科学研究实践经验,逐步形成了新的科学思想——控制论思想。

第二次世界大战期间,维纳参加了预测理论的研究和防空火炮自动控制系统的研制工作,与早期的电子计算机设计者密切交往,对电子计算机设计的改进提出过很好的建议。在实践中,维纳等人发现,人的有意识活动与控制工程师所说的“反馈”有着重要的联系,是一种有反馈的环形过程。1943年维纳等人发表了《行为、目的和目的论》一文,提出“一切有目的的行为都可以看作需要负反馈的行为”,第一次用反馈说明目的性行为。后来维纳又进一步把无线电工程的信息概念,自动控制技术中的反馈概念引入有生命的活机体行为的研究中,还把原来属于人文科学的行为、目的等概念引入机器,阐明控制机器就其行为和目的而言,与人的控制行为与目的是相同的。通过科学的思维和类比,维纳发现了动物和机器的控制行为的共同点并站在更概括

的理论高度加以综合,提出了控制论思想;动物和自动控制机器都是“系统”,都普遍存在信息的传输过程(即信息的获取、变换、存贮、处理),存在信息反馈;动物和机器依靠信息的运动,特别是信息反馈,来实现“合乎目的”的运动。例如,人要拿起一只杯子,大脑就指挥手的运动来实现这一动作,而感觉器官不断将有关每一瞬间手与杯子相对位置的信息送回大脑(反馈),大脑根据这些信息不断调整手的运动,直至最后拿起杯子。自动控制系统中也有类似过程。例如使直流电动机自动保持所要求转速的自动调速系统,用测速发电机(传感器)检测电动机的实际转速,把这信息送入控制器。控制器根据实际转速与所要求转速之差异,调整电动机电枢的电压,以消除转速的偏差。维纳科学地揭示了动物和机器的控制行为的共同点,创立了一门新科学理论。他把希腊词语“掌舵人”引伸过来,创造一个新术语“控制论”作为这一门新学科的名称。

控制论的研究对象是“能够根据环境的某些变化重新组织自己的运动的各种系统(即自动控制系统)”,这里的“系统”可以是工程系统、生物系统,也可以是经济系统、社会系统、生态系统。控制论从控制这个角度研究这些系统的共同规律。它撇开对象物质和能量的具体形态,抓住这些系统通过信息的获取、传递、变换和处理以实现控制的规律进行研究,着重从定量关系上揭示其内在联系。它研究的不是物质运动本身,而是代表物质运动的事物因素之间的关系。控制论还侧重于系统动态特性的研究,不是研究系统此时此地的行为,而是着重研究所有可能的行为方式和状态及

其变化趋势。控制论致力于研究系统状态的变化规律和对系统的变化过程进行人工干预(即控制)的可能性,且在人工控制为可能时,研究采用何种控制方式才能使系统以最好的方式达到人们所期望的状态。它是一门技术科学。

控制论的主要方法是信息方法、黑箱方法与功能模拟方法。这些方法具有跨学科且普遍适用的特征。

信息方法着重于从信息方面来研究系统的结构与功能。“控制”的实质是控制系统的信息。

黑箱方法是一种在不能直接观察系统内部状态或系统内部结构的情况下,通过主动试验和观测,根据系统的输入及相应的输出(称为对输入的响应)来研究系统的方法。客观世界存在着许多无法“打开”来直接研究其内部状态的系统,如研究人脑时就不能打开人脑,否则会失去活脑的功能。所以黑箱方法有着广泛的应用。如中医师通过望、问、闻、切来诊断疾病就是使用了黑箱方法。对系统动态观测的黑箱方法已发展成为控制论的一种重要方法——系统辨识法。

功能模拟方法是以不同系统的功能和行为相似为基础,用一个系统(模型)模仿另一个系统(原型)的功能和行为的研究方法。这种方法着重模拟具有控制和通讯功能的系统的合乎目的性的行为,它不要求分析系统内部机制,不追求模型的物理结构与原型相同。这就提供了一种利用不同结构的系统去实现相同功能的方法,如用计算机模拟人脑的记忆、运算等功能。这种方法也开辟了通过模型研究原型的功能、行为的新途径,如可以用计算机仿真代替部分实

物实验。

四十多年来,控制论得到迅速发展,它的思想与方法广泛应用于自然科学、社会科学、思维科学、人体科学的研究中,产生了许多分支学科。今天,控制论已发展成为一个庞大的科学部门。许多人认为,控制论有四大分支。

### 一、工程控制论

我国著名科学家钱学森最先倡导应用控制论思想来提高自动控制理论的水平。他于1954年发表名著《工程控制论》,创立了工程控制论这一分支。该书所阐述的科学思想、理论和方法对控制论的发展产生了重大影响,钱学森赋予这门学科的含义很快为全世界工程技术界所接受。美国学者 R. E. Kalman 对工程控制论的发展作出了重要贡献。

工程控制论研究各种工程技术中的自动控制系统的分析与设计问题。它是直接为自动控制技术提供理论基础的。

工程控制论的发展经历了三个阶段。第一、经典控制理论阶段。主要研究单输入单输出线性系统。主要方法是频域法,基本内容是频率法与根轨迹法,它是局部自动化的理论基础,主要技术装置是模拟式自动调节器;第二、现代控制理论阶段。主要研究多输入多输出系统,解决全盘自动化与生物系统的控制问题,主要研究方法是时域法(又称状态空间法),基本内容是能控能观性理论、最优控制理论、反馈控制理论、最优滤波与随机控制理论,主要技术装置是电子计算机;第三、大系统控制理论阶段。主要解决生物系统、社会经济系统、大型工程系统这样一类规模庞大、结构复杂、因素众多、功能综合的大系统的控制问题,主要方法是时域

法,主要内容是大系统的递阶控制、分散化控制,技术装置是分布式计算机系统和计算机网络。

## 二、生物控制论

生物控制论运用控制论思想研究生物体的控制、调节规律和信息处理机制。例如研究生物的生理、生化过程的控制;研究神经系统、血压、呼吸、体温、内分泌、经络和运动系统的信息处理和控制的机制;探讨人脑的学习、记忆、联想功能;研究对生物遗传性能进行控制等。生物控制论的发展对揭示生命现象的本质具有重大意义。

生物控制论中已形成神经控制论、医学控制论等分支,应用控制论思想研究中医理论已取得许多成果。

## 三、社会控制论

1843年,法国物理学家安培曾经把“控制论”一词用于他所设想的国家管理科学。这决不是偶然的巧合。控制论所研究控制规律在社会经济系统中也是广泛存在的。社会是一个活的自组织系统,有各种信息反馈,而决策就是社会系统的一种控制作用。所以控制论思想完全适用于研究社会。社会控制论就是应用控制论的思想和方法研究社会、经济系统而形成的。社会控制论最早出现的是经济控制论——用控制论方法研究经济系统的科学。它的发展促进了经济管理的现代化。我国科学家宋健等用控制论思想研究人口系统的控制问题,创立了“人口控制论”这一分支,为解决我国人口问题作出了贡献。

## 四、智能控制论

运用控制论思想研究人类控制智能(如最优化、自适

应、自学习、探索、联想等)的机制并把它们引入控制系统,设计、建造功能更完善的智能控制系统的理论构成智能控制论的基本内容。自适应、自学习、自组织控制系统及带专家系统的控制机已经诞生并得到应用,显示了智能控制的优越性。

控制论冲破传统的思维方式和研究方法的束缚,揭示了工程技术系统、生物系统、社会系统的共同控制规律,它的思想在科学方法论方面引起了巨大变革。它的诞生在自然科学、社会科学、思维科学、人体科学等学科之间架起了相互渗透的桥梁,大大促进了各种交叉学科的形成和发展,大大推进了现代科学技术一体化的进程。它正在对现代科学的发展产生越来越深刻的影响。

我国科学家对控制论的发展作出了重要贡献。1960年,我国与一些国家联合发起,成立了“国际自动控制联合会”(IFAC)。1980—1981年,钱学森、宋健著的《工程控制论》(修订版)出版。这部130万字巨著总结了工程控制论问世后三十多年来的主要进展,其内容实际上已经越出了工程技术的范围,而广泛地涉及生物控制论、社会控制论、智能控制论这些控制论分支了。它的出版是我国乃至世界控制论界的一件大事。目前我国控制论工作者正结合四化建设实际,积极开展控制论研究。控制论在我国有十分广阔的发展前景。

本教程介绍工程控制论的基本理论。因教学时间限制,本课程未能涉及工程控制论的重要分支滤波理论,读者可参阅李文清等编著的《滤波理论》一书。

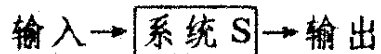
掌握工程控制论对系统工程专门人才是十分重要的。宋健同志曾给“系统工程”下过一个完善的定义：“系统工程是按照系统科学的思想，应用信息论、控制论、运筹学等理论，以信息技术为工具，用现代工程的方法去研究和管理系统的技术。”他又指出：“就方法论来看，系统工程研究系统（无论是社会系统还是工程系统）的主要方法是数学模型，用变量描述系统的状态；用数学方程式去定量反映各变量之间的相互联系，如各种平衡关系；用递推方程式去描述系统状态的发展趋势；找出影响事态发展的因素（控制变量），研究如何把这些因素当作杠杆，防止出现灾难性态势，引导（控制）系统向人们所希望的方向发展，以达到预期的目标。这个过程的前半部属于系统科学的研究范围，后半部是控制论的任务。”

## § 2 控制论的基本概念

### 1. 系统 (Systems)

控制论的研究对象是系统，包括工程系统、生物系统、社会经济系统等。什么是“系统”？系统是“由相互作用、相互联系的若干组成部分按一定规律结合而成的具有特定功能的有机整体”。系统与外部环境是普遍联系、互相影响的。不受其它事物影响而又不影响其它事物的绝对孤立系统实际上是不存在的。为了便于研究，控制论把所要研究的对象从与外界的相互联系中相对孤立出来，不考虑与研究目的无关或次要的联系，突出主要联系，并规定这些联系在特定

的“输入”(外界对系统的影响)通道与“输出”(系统对外界的影响)通道中进行,这样的系统叫相对孤立系统。“系统”可用如下框图表示:



控制论是从“控制”这个角度来研究系统的运动规律的,所以它只研究一切具有控制作用的相对孤立系统,叫控制论系统。这种系统可以分解为两个子系统,即控制子系统与受控子系统(受控对象)。受控对象的输出就是所要控制的量。控制子系统在信息加工的基础上,产生对受控对象的控制作用,影响受控对象的行为。控制作用的选择包含二方面因素:决定控制目标和达到目标的途径(后者的理论描述是系统状态的变化轨道);通过不断调节使系统保持在所规定的轨道上。因此控制子系统又可分为两个功能部分:设定目标(由输入作用指定)并进行比较的部分以及进行调节的部分(叫控制器)。

## 2. 信息 ( Information )

信息是控制论的重要基本概念。根据控制论思想,控制系统是通过信息传输过程才得以实现“合乎目的”的运动的。控制系统的任务是获取、处理信息,进而控制信息。因此,关于信息的理论是控制论的一个基础。

什么叫信息?维纳说过:“信息是人们在适应外部世界并使这种适应反作用于外部世界的过程中,同外部世界进行交换的内容的名称。”信息不是外界事物本身,而是事物通过联系用以表示其特征的一种普遍形式。



在自动控制系统中,通常见到的是信号的流动。信号是指某些物理过程,其变化受到控制,而且可以通过某些媒介进行传播。如无线电信号就是一种变化受到控制的电磁波。如果人们事先约定每一种信号代表一种消息(如电报中以“点”“划”的一定组合代表一定的字母与符号),那么就可以利用信号的传播把消息传送到别处去。消息的内容就是信息。信息是消息的内核,消息是信息的外壳,而信号则是信息的载负者。信息既表示事物的某种特征,又能排除信息接受者的某种“不确定性”。一个人对某种外界事物缺乏认识,就表现为某种不确定性。在获得有关信息后,这种“不确定性”就减少或消除了。所以信息的量可以用该信息所排除的“不确定性”的大小来计算。“不确定性”的大小可用概率函数表示,因而这种信息量是统计量。C. E. Shannon 与维纳分别提出如下的信息量公式:

$$H = - \sum_{i=1}^n P_i \log P_i$$

这里  $H$  为信息量,  $P_i$  为第  $i$  个事件发生的概率,  $i=1, 2, \dots, n$ , 共有  $n$  个事件,  $\sum_{i=1}^n P_i = 1$ 。若对数以 2 为底, 则  $H$  的单位为比特(Bit)。例如, 若  $P_1=1, P_2=P_3=\dots=P_n=0$ , 即信息接受者已预先知道事件 1 必然发生, 接受信息后被消除的不确定性为零, 由上式求出  $H=0$  (规定  $0 \cdot \log 0 = 0$ ); 若各事件等概率,  $P_i = \frac{1}{n}$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ), 究竟哪一事件发生, 事先无法估计出来, 要接受信息后才能确定。此时的信息量  $H = \log n$ , 达到最大值。