

Linear System Theory

Chinese Version

线性系统理论

(第2版)

段广仁

哈尔滨工业大学出版社

Linear System Theory

(Chinese Version)

线性系统理论

(第2版)

段广仁

哈尔滨工业大学出版社

·哈尔滨·

内 容 简 介

本书系统地阐述了以状态空间方法为主的线性系统的时间域理论。全书共分十二章：第一章介绍与本书密切相关的一些数学基础知识；第二章介绍线性系统的数学描述；第三章至第五章阐述线性系统的分析理论，分别介绍线性系统的运动分析、能控性和能观性分析以及稳定性分析；第六章至第十章阐述线性系统的设计理论，分别介绍线性系统的极点配置和特征结构配置、镇定与渐近跟踪、线性二次型最优控制、解耦控制、状态观测器等设计问题；第十一章概括性地介绍离散线性系统理论；第十二章介绍鲁棒性的概念和几个基本的鲁棒控制问题。

本书结构清楚、层次分明、论述严谨、重点突出，注重基本概念、基本原理和基本方法。在内容上以基本的分析和设计问题为主，同时介绍了线性系统理论的一些新进展和作者的一些相关研究成果。本书可作为高等工科院校自动控制及相近专业本科高年级学生和研究生的教材，也可供广大科研工作者、工程技术人员以及高等院校教师参考或自学。

图书在版编目 (CIP) 数据

线性系统理论/段广仁. —2 版. —哈尔滨：哈尔滨工业大学出版社，2004.2

ISBN 7-5603-1181-4

I. 线… II. 段… III. 线性系统理论
IV. 0231.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 126867 号

责任编辑 黄菊英 岳 崇

封面设计 卞秉利

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006

传 真 0451 - 86414749

网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>

印 刷 哈尔滨市工大节能印刷厂

开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 25.75 字数 626 千字

版 次 2004 年 2 月第 2 版 2006 年 1 月第 4 次印刷

印 数 11 001 ~ 14 000

定 价 37.00 元

(如因印装质量问题影响阅读, 我社负责调换)

第2版前言

本书的第1版作为国家教育部重点图书于1996年11月在哈尔滨工业大学出版社出版。该书的问世得到了许多师生的热情帮助。作者1995年秋季学期教过的全体研究生都对本书做了许多的校对工作,特别是本人的学生胡文远、马克茂和刘湘黔,还协助完成了书中部分内容的打字工作。另外,本书的许多内容都得益于王恩平教授、郑大钟教授和刘豹教授的著作。

记得1995年本书刚刚成形之际,作者在线性系统理论课程教学过程中以王恩平教授的著作为主要参考书。王老师寄来了几十本书,分文未取。在本人的成长过程中,许多控制界的前辈都给予了热情的关怀与照顾,王老师便是其中之一。我于1996年去英国前,王老师病重,我曾给他写过信,并想找机会探望,并将书款还给他,但因工作较忙,未能如愿。后来我于英国获悉王老师不幸过世,此事成为终生的遗憾。

出乎本人预料的是,本书出版仅一年便销售告罄,同时还有幸获得了第八届全国优秀科技图书二等奖。我愿以此书及其所获奖项献给尊敬的王恩平老师。

为满足广大读者的需求,本书于1998年2月重印。由于当时本人正在英国访问,未能在内容上进行任何删改,只是对第1版中的一些错误进行了校正。本人的同事陈兴林教授和本人当年的博士生关新平教授等在此书第2次印刷的修改、校正与编辑过程中付出了艰辛的劳动。借此机会向他们表示感谢。值得高兴的是,仅在获得第八届全国优秀科技图书二等奖次年的同一时间,本书又获得了第十一届中国图书奖。对于当时正在英国访问的我,这无疑是个意外的收获。

现在本书的重印版也已销售告罄。此书获得的奖励和销售的数量与速度都充分说明了国内控制界同行与广大读者对该书的欣赏和承认。在修订再版之际,我愿再次向该书的广大读者表示衷心的感谢。愿此书的第2版能够得到更多读者的欢迎和肯定。另外,为了加快我国高等院校教学过程的国际化进程,并满足越来越多的读者对英文控制理论专业书籍的需求,我们还完成了此书的英文版《Linear Systems Theory》,拟于2004年11月出版。此外,作者新近完成的本书的姊妹篇《Descriptor Linear Systems》(《广义线性系统》)也将很快与读者见面。希望也能受到广大读者的欢迎。

本次修订再版,在修改第1版的同时,还于第六章中增加了动态补偿器特征结构配置的参数化方法一节,于第十章中增加了线性系统的PI

观测器一节。在整个修改过程中，本人又一次得到了许多同行、同事的热情帮助。特别是哈尔滨工业大学控制科学与工程系的陈兴林教授和胡广大教授，提供了他们在线性系统理论课程教学过程中发现的所有问题。本人 2000~2003 年间在读的博士生和硕士生也都做了许多工作，协助本人完成了整个书稿的修改、校对与编辑。许多热情的读者，如武汉卓刀泉解放军某部的傅明坤同志，还费心寄来了在阅读该书过程中所发现的问题。本人在此表示衷心的感谢。本书中的一些工作得到了国家杰出青年科学基金的资助，在此本人亦向国家基金委表示感谢。另外，我还要再次感谢哈尔滨工业大学出版社领导的大力支持和本书责任编辑黄菊英同志的辛勤劳动。

尽管此书已经多次再版，并得到了许多同行、学者和学生的指正，但由于作者水平有限，书中不当之处仍在所难免，恳请广大读者和同行进一步批评指正。

段广仁

2003 年 7 月

于哈尔滨工业大学

第1版前言

线性系统理论是现代控制理论中最基本、最重要也是最成熟的一个分支,是生产过程控制、信息处理、通信系统、网络系统等多方面的基础理论。其大量的概念、方法、原理和结论对于系统和控制理论的许多学科分支,诸如最优控制、非线性控制、随机控制、系统辨识、信号检测和估计等都具有十分重要的作用。因而,国内外许多高等院校都将线性系统理论作为系统和控制科学课程方面的一门最基础的课程。

有关线性系统理论方面的著作或教材现在已有很多。美国纽约州立大学石溪分校陈启宗教授著的《线性系统理论与设计》^[1],在国内外影响很大;清华大学郑大钟教授著的《线性系统理论》^[2],内容系统全面;还有其它许多这方面的著作和教材^[3~10],都各具特点。

本书是作者近年来在哈尔滨工业大学从事自动控制专业研究生《线性系统理论》课程教学的基础上写成的。本书在写作过程中力求做到结构清楚,层次分明。作为高等院校自动控制或相近专业高年级本科生和研究生的教材,本书在选材上没有包含以多项式矩阵方法为主的复频域理论,而只是系统地介绍了以状态空间方法为主的时间域理论。考虑到高等院校研究生的《线性系统理论》课一般都只有60学时左右,因而,本书将重点放在了线性系统理论中最基本、最重要的分析和设计问题之上。另一方面,为了适合广大工程技术人员和科学工作者使用以及学生将来的进一步深入研究之需要,本书还包含了一些带有“*”号的选学内容。第一次接触线性系统理论的读者可跳过这些内容,这样并不影响对于基本内容的理解。

本书包含了一批作者近年来的工作,如第六章中的特征结构配置设计和整个第十二章关于鲁棒控制的介绍,此外还有1.6、5.4、6.6、7.4、9.2、9.3、10.3、10.5等各节的内容。这些内容是于作者的许多工作中筛选出来的,并与全书内容有机地融为一个系统的整体。另外,这些内容也在一定程度上反映了线性系统理论近年来的新进展和本书的时代性。

在作者的教学过程中,学生普遍反映的一个问题是这门课程的“数学性”太强。针对这一点,本书第一章介绍了本书后续内容中经常用到的一些数学基础知识,其中1.6节介绍的广义Sylvester矩阵代数方程为作者的成果,在后续的特征结构配置设计、模型参考渐近跟踪设计、观测器设计和鲁棒极点配置设计等内容中屡次用到。

离散系统理论在很大程度上是与连续系统理论平行的。作者认为初涉线性系统理论的读者可以首先只学习连续系统方面的内容,因而将离散线性系统理论中的一些最基本的问题作为选学内容单独列在第十一章之中,并使其自成体系。

鲁棒控制是近年来国际控制理论界中十分活跃的一个研究领域, 目前已经有了相当丰富的内容。本书第十二章作为选学内容对鲁棒控制进行了简单的介绍。应该指出, 鲁棒控制的内容非常广泛, 即使一本内容丰富的鲁棒控制方面的专著也无法囊括鲁棒控制的全部内容。我们将鲁棒控制加入本书的目的是为一些未接触过鲁棒控制的读者提供一个入门的机会。

许多现有教材都是将系统设计的内容归在一章中笼统讲述的。而本书则将系统设计的几个基本问题——极点配置与特征结构配置、镇定与跟踪、二次型最优调节、解耦控制、观测器设计分成五章分别讨论, 这样做可以使读者对控制系统设计有一个整体的认识, 并对每一个具体的问题能有一个更加深入、全面的了解。

本书的每一章末尾都有一个小结和一定量的习题。小结中对全章的内容给出了简单扼要的概括和总结; 为读者指出对于某些内容进行深入研究所需阅读的文献; 提示读者在学习某些内容时应注意的一些问题; 对某些理论和方法给出适当的评价; 指出某些内容与其它章节内容的联系等等。在习题的配备上, 除了一些基本的用以巩固一些基本原理和方法的计算题外, 我们还有意识地配备了一定数目的思考题和证明题。它们对于加深基本概念和原理的理解是非常有益的。

在本书的写作过程中, 许多地方得益于王恩平教授、郑大钟教授和刘豹教授等人的著作^[2,3,7]。这些著作作为本书的一些基本内容提供了部分素材。另外, 本人的学生胡文远、马克茂和刘湘黔等人协助完成了书中部分内容的打字和校对工作。本人教过的许多研究生, 特别是1995年秋季学期教过的全体研究生都对本书做了许多校对工作, 同时还提出了许多宝贵意见。作者的同事陈兴林同志不仅协助审阅了本书的全部校样, 而且在协助作者授课的过程中, 对书中的许多内容还提出了建设性的意见。对于这些同志的热诚帮助和辛勤劳动, 作者在此表示真诚的感谢。另外, 在本书的写作过程中, 作者得到了哈尔滨工业大学校领导、研究生院和航天学院领导以及控制工程系领导的大力支持, 在此作者一并表示感谢。

由于作者水平有限, 书中错误和不当之处在所难免, 敬请读者和同行批评指正。

段广仁

1996年6月

于哈尔滨工业大学

符 号 表

符 号

$A, B, \Phi, \dots$

$u, y, \phi, \dots$

$u, y, \alpha, \dots$

$V, \Omega, \dots$

0

$\mathbf{C}^{m \times n}$

$\mathbf{R}^{m \times n}$

$\mathbf{C}^n$

$\mathbf{R}^n$

$\mathbf{C}$

$\mathbf{R}$

$\mathbf{R}^{n \times m}[s]$

$\mathbf{R}^{n \times m}(s)$

$\dim V$ 或 $\dim(V)$

$\exists$

$\in$

$\forall$

$\subset$

$\supset$

$\cup$

$\cap$

$p \Rightarrow q$

$p \Leftarrow q$

$p \Leftrightarrow q$

$\dot{x}$

$\ddot{x}$

$\ddot{x}$

$x^{(i)}$

含 义

大写黑斜体字母表示矩阵

小写黑斜体字母表示向量

小写斜体字母表示标量函数或标量

大写斜体英文字母或大写正体希腊字母表示集合

零数字、零向量或零矩阵

所有 $m \times n$ 复元素矩阵的全体

所有 $m \times n$ 实元素矩阵的全体

所有 n 维复列向量的全体 (即 $\mathbf{C}^{n \times 1}$)

所有 n 维实列向量的全体 (即 $\mathbf{R}^{n \times 1}$)

所有复数的全体 (即 $\mathbf{C}^1$)

所有实数的全体 (即 $\mathbf{R}^1$)

所有关于 s 的 $n \times m$ 阶实系数多项式矩阵的全体

所有关于 s 的 $n \times m$ 阶实系数有理分式矩阵的全体

子空间 V 的维数

存在

元素属于

任取

集合含于

集合包含

集合的并

集合的交

p 蕴涵 q

q 蕴涵 p

p 等价 q

$= \frac{d}{dt} x$

$= \frac{d}{dt} \dot{x}$

$= \frac{d}{dt} \ddot{x}$

$= \frac{d^i}{dt^i} x$

$\ x\ $ 或 $\ x\ _2$	向量 x 的欧氏范数
I_n	n 阶单位矩阵
A^{-1}	矩阵 A 的逆
A^T	矩阵 A 的转置
$\bar{A}$	矩阵 A 的共轭
A^*	矩阵 A 的共轭转置
$A > 0$	矩阵 A 正定
$A \geq 0$	矩阵 A 半正定
$A > B$	$A - B > 0$
$A \geq B$	$A - B \geq 0$
$\lambda_i(A)$	矩阵 A 的第 i 个特征值
$\lambda_{\max}(A)$ 或 $\bar{\lambda}(A)$	矩阵 A 的最大特征值
$\lambda_{\min}(A)$ 或 $\underline{\lambda}(A)$	矩阵 A 的最小特征值
$\rho(A)$	矩阵 A 的谱半径
$\sigma(A)$	矩阵 A 的谱 $\{\lambda \det(\lambda I - A) = 0\}$
$\sigma_i(A)$	矩阵 A 的第 i 个奇异值
$\sigma_{\max}(A)$ 或 $\bar{\sigma}(A)$	矩阵 A 的最大奇异值
$\sigma_{\min}(A)$ 或 $\underline{\sigma}(A)$	矩阵 A 的最小奇异值
$A^{1/2}$	由 $(A^{1/2})^T (A^{1/2}) = A$ 定义
$\ A\ _2$	矩阵 A 的谱范数
$\ A\ _F$	矩阵 A 的 Frobenius 范数
$\ A\ _1$	矩阵 A 的行和范数
$\ A\ _\infty$	矩阵 A 的列和范数
$\mu_i(A)$	由 $\ A\ _i (i = 1, 2, \infty)$ 导出的测度
$\operatorname{Re} A$ 或 $\operatorname{Re}(A)$	矩阵 A 的实部
$\operatorname{Im} A$ 或 $\operatorname{Im}(A)$	矩阵 A 的虚部
$\operatorname{tr} A$ 或 $\operatorname{tr}(A)$	矩阵 A 的迹
$\det A$ 或 $\det(A)$	矩阵 A 的行列式
$\operatorname{rank} A$ 或 $\operatorname{rank}(A)$	矩阵 A 的秩
$\operatorname{adj} A$ 或 $\operatorname{adj}(A)$	矩阵 A 的伴随矩阵
$\operatorname{diag}(s_1, s_2, \dots, s_n)$	由 $s_1, s_2, \dots, s_n$ 构成的对角阵
$\Delta\Delta\Delta$	证明结束符

目 录

绪论

0.1 现代控制理论概述	1
0.2 线性系统理论概述	4
0.3 本书的内容安排	9

第一章 数学基础

1.1 线性空间与线性变换	11
1.2 矩阵代数中的几个结果	16
1.3 多项式矩阵	20
1.4 有理分式矩阵及其互质分解	25
1.5 Jordan分解	29
1.6 广义Sylvester矩阵方程	35
小结	39
习题	40

第二章 线性系统的数学描述

2.1 线性系统的传递函数描述	44
2.2 线性系统的状态空间描述	46
2.3 两种描述形式的比较及相互转换	52
2.4 线性系统的代数等价性	60
2.5 复合系统的数学模型	62
小结	65
习题	66

第三章 线性系统的运动分析

3.1 运动分析的含义	69
3.2 状态转移矩阵及其性质	71
3.3 线性时变系统的运动分析	74
3.4 线性定常系统的运动分析	76
3.5 脉冲响应矩阵	80
小结	84
习题	85

第四章 线性系统的能控性和能观性

4.1 能控性和能观性的定义	87
4.2 线性时变系统的能控性判据	91
4.3 线性定常系统的能控性判据	95
4.4 对偶原理与能观性判据	98
4.5 线性系统的能控、能观性指数	103
4.6 单输入-单输出线性系统的能控规范型和能观规范型	107
4.7 多输入-多输出线性系统的能控规范型和能观规范型	114
4.8 线性系统的结构分解	125
*4.9 线性系统的实现问题	135
小结	139
习题	140

第五章 系统的运动稳定性

5.1 Lyapunov意义下的运动稳定性	144
5.2 线性时变系统的稳定性判定	151
5.3 线性定常系统的稳定性	157
*5.4 二阶动力学系统的稳定性	162
*5.5 线性系统的外部稳定性	165
小结	168
习题	168

第六章 极点配置与特征结构配置

6.1 线性系统的常规控制律	171
6.2 极点配置问题及其解的存在性	175
6.3 状态反馈极点配置问题的求解方法	181
6.4 状态反馈特征结构配置	186
*6.5 输出反馈特征结构配置	191
*6.6 动态补偿器特征结构配置	199
*6.7 模型匹配(Model Matching)问题	206
小结	209
习题	210

第七章 镇定问题与渐近跟踪问题

7.1 镇定问题及其解的存在性	213
7.2 线性系统的状态反馈镇定律设计	216

7.3 渐近跟踪问题——定常参考信号的情形	220
*7.4 模型参考输出跟踪问题	224
小结	231
习题	231
第八章 线性二次型最优控制	
8.1 变分法简介	234
8.2 有限时间状态调节器问题	239
8.3 无限长时间状态调节器问题	245
*8.4 输出调节器问题	249
*8.5 输出跟踪问题	252
小结	256
习题	256
*第九章 线性系统中的解耦问题	
9.1 输入-输出解耦问题	258
9.2 输入-输出动态解耦——可解耦条件	262
9.3 输入-输出动态解耦——算法与算例	268
9.4 干扰解耦	273
9.5 跟踪系统中的干扰解耦	277
小结	285
习题	285
第十章 状态观测器设计	
10.1 全维状态观测器	288
10.2 降维状态观测器	292
10.3 Luenberger函数观测器	297
10.4 观测器——状态反馈控制系统与分离原理	303
*10.5 环路传递复现(LTR)问题	307
10.6 全维PI观测器	311
小结	317
习题	319
*第十一章 离散线性系统理论	
11.1 离散动态系统的数学描述	321
11.2 线性离散系统的运动分析	323

11.3 线性连续系统的时间离散化·····	326
11.4 离散时间系统的稳定性·····	330
11.5 离散时间系统的能控性和能观测性·····	335
11.6 连续系统时间离散化后保持能控和能观测的条件·····	340
11.7 离散系统的控制问题·····	344
小结·····	349
习题·····	350
*第十二章 鲁棒控制	
12.1 鲁棒性定义·····	352
12.2 鲁棒控制的研究内容·····	355
12.3 时域稳定鲁棒性分析·····	358
12.4 线性系统的输出反馈鲁棒镇定·····	366
12.5 鲁棒极点配置·····	371
12.6 鲁棒Luenberger观测器设计 ·····	379
小结·····	385
习题·····	386
参考文献 ·····	387

绪 论

0.1 现代控制理论概述

线性系统理论是现代控制理论的一个重要组成部分,因此,在了解线性系统理论之前,了解一下现代控制理论,弄清楚线性系统理论在现代控制理论中的位置与地位是非常必要的。

控制理论包括古典控制理论和现代控制理论两大部分。

0.1.1 从古典控制理论到现代控制理论

古典控制理论的起源可以追溯到20世纪20年代。在20世纪20~40年代之间,曾涌现出许多古典控制理论的先驱,如Minorsky, Nyquist, Hagen, Bode和Wiener等。他们的工作^[11-15]为古典控制理论奠定了基础,同时促进了二次大战中的许多武器和通信自动化系统的研制工作。大战后人们更多地总结了武器研制和设计方面的实践经验,陆续出版了古典控制理论方面的一些古典著作^[16,17],建立了较为系统的伺服理论。这对战后的许多实际自动控制工程起到了良好的指导作用,也为人类在较短的时间征服宇宙空间做出了贡献。二次大战后到50年代中期,控制理论又得到了新的发展,添加了根轨迹法、非线性系统的谐波近似法(描述函数法)、采样控制系统、自寻最优控制和部分最优控制、多变量系统、系统灵敏度分析和动态系统测试等新内容。到60年代初期,出现了划时代意义的状态空间方法、极大值原理和Kalman滤波技术以及Bellman动态规划。至此,使古典控制理论的发展与现代控制理论接轨。

概括性地讲,古典控制理论是具有下述特点的一门科学:

- ① 以单变量线性定常系统为主要研究对象。
- ② 以频率法作为研究控制系统动态特性的主要方法。
- ③ 以各种图表,如Nichles图、Bode图、Nyquist曲线、根轨迹、Routh表等作为系统分析和综合的主要工具。

在特定输入下研究系统输出的运动规律,称为系统的运动分析,而按一定动态性能要求,如稳定性、误差精度和各种动态指标——飞升时间、带宽、超调量和误差系数等,来改变这种运动规律,称为系统综合。值得指出的是,在古典控制理论的发展过程中,开始和后来都曾用过时域方法,如微分方程和差分方程描述等,但频域法却是主导的。同样,古典控制理论发展的后期,也曾研究过多变量系统和非线性系统,但从整体上看,它是以研究单变量线性定常系统为主的。

0.1.2 现代控制理论的形成与特点

现代控制理论起源于20世纪60年代。它以下述三个方面作为其形成的标志:

- ① 用于系统的整个描述、分析和设计过程的状态空间方法。
- ② 最优控制中的Pontriagin极大值原理和Bellman动态规划。
- ③ 随机系统理论中的Kalman滤波技术。

现代控制理论是在古典控制理论的基础上发展起来的。但不同于古典控制理论,它具有下述几方面的特点:

① 以多变量线性系统和非线性系统为研究对象。近代工业过程和航空、航天等许多领域中的实际系统都是非常复杂的,其中包含有多变量耦合、时变参数和非线性等等。这些复杂的系统都在现代控制理论的研究之列。事实上,作为现代控制理论形成标志之一,最优控制理论中的Pontriagin极大值原理,即是针对一般的非线性系统提出的。

② 以时域法,特别是以状态空间方法为主要研究方法。不同于古典控制理论,现代控制理论是在时间域上建立系统模型的状态空间描述,并在此基础上进行系统的各种定量和定性分析以及希望的控制规律设计。

③ 以现代数学为主要分析手段。古典控制理论以复变函数理论和Laplace变换为数学工具,而现代控制理论则涉及到现代数学的许多领域。研究对象从单变量线性定常系统过渡到多变量系统和非线性系统,必然对分析手段提出了更高的要求;系统描述从频域转为时域为现代数学的介入提供了方便条件。现代控制理论中应用较多的数学分支是矩阵代数和微分方程理论。然而在现代控制理论已经得到了极大发展的今天,许多新的分支不断涌现。在20世纪60年代看来和控制理论根本无缘的许多数学理论,现已被用于现代控制理论新分支的研究之中。李代数理论用于离散事件系统、微分几何用于非线性系统都是这方面的例子。

④ 以计算机为主要实现工具。我们这里所讲的“实现”,并不是指将一个系统付诸于实际运行,而是指其分析和设计过程的实现。在古典控制理论中,由于研究对象简单,人们利用一些图、表通过手工即可完成分析和设计。但在现代控制理论中,单靠手工计算一般是无法完成较为复杂的研究对象的分析和设计的,而必须要利用计算机来实现分析和设计中的各种计算。目前,以计算机为主要工具、以现代控制理论为依据的一个现代控制理论分支——控制系统计算机辅助设计(CSCAD)已经日趋完善,并在实际中得到了重要的应用。计算机用于控制系统设计除在计算上显示了其极大的优越性外,还有许多其它的优点。如在计算机上很容易修改系统的参数,因而可对各种控制方案及不同的参数组合进行充分地比较,从中选出较好的控制方案。另外,借助于计算机的图形显示功能,可对控制系统的动态特性获得更加深入的直观的理解。

尽管古典控制理论和现代控制理论各有其特点,但二者却是密切相关的。对此我们谈及下述两个方面:

① 任何事物都处于不断的发展变化之中,古典和现代控制理论从产生到发展至今天,已经在许多方面相互渗透。如英国Rosenbrock学派的多变量频域理论^[18]和控制系统中的多项式矩阵方法^[2,19]都属于两者交叉的内容。

② 即使在古典控制理论的约定研究范围之内,也即单变量线性定常系统的分析和设计之中,尽管古典方法和现代方法从模型描述到设计方法各不相同,但二者的设计结果可在Laplace变换及其逆变换下相互转化。从这种意义上讲,二者在单变量系统的分析和设计上是统一的。

0.1.3 现代控制理论的研究内容与分支

控制理论的研究对象是系统,而所谓的控制是指对系统的控制。从这一角度来看,现代控制理论的研究内容和分支在很大程度上要取决于系统的范畴。

系统的概念及其含义是比较广泛的。系统是由相互关联和相互作用的若干部分按一定规律组合而成的具有特定功能的一个整体。系统可具有完全不同的属性,如工程系统、生物系统、经济系统、社会系统等。但是,在系统理论中,常常抽去具体系统的物理或社会含义而把它抽象化为一个一般意义下的系统加以研究,这种处理方法有助于揭示系统的一般特性。系统的概念具有相对性,系统的每个组成部分也可以是一个系统,而系统自身又可以是一个更大系统的组成部分。系统最基本的特征是它的整体性,系统的行为和性能是由其整体所决定的,系统可以具有其组成部分所没有的功能。组成部分相同但其关联和作用不同的两个系统,可呈现出截然不同的行为和功能。

系统有静态系统和动态系统之分。动态系统又称之为动力学系统,其含义是含有动力学行为,在模型描述上表现为含有系统变量的导数项或差分项,也即系统模型可用微分或差分方程来部分或完全描述。而静态系统的模型则只是各变量间的代数方程。在系统与控制理论中,主要研究动态系统。

对于动态系统,有连续和离散之分。凡是用微分方程描述的系统为连续系统;凡是用差分方程描述的系统为离散系统。对于连续和离散系统,有线性性和非线性之分。凡在其模型描述中含有非线性微分或差分环节的系统称之为非线性系统,而在其模型中只含有线性微分或差分环节的系统称之为线性系统。对于线性性和非线性系统,又都有确定性和随机性之分。凡在其模型描述中含有随机变量的系统称之为随机系统,而那些其模型中不含有随机变量、只含有确定性变量的系统称之为确定性系统。进一步对于确定性系统和随机系统,又都有正常和奇异之分。所谓正常系统是指在其模型描述中状态变量的个数与微分或差分环节数目一致的系统;而奇异系统是指那些模型中同时含有状态的微分或差分方程和代数方程的系统。奇异系统也常称为广义系统。对于正常系统和广义系统,又都有单变量和多变量之分。凡是具有一个输入变量和一个输出变量的系统称之为单变量系统,而凡是具有多个输入和/或多个输出的系统称之为多变量系统。对于单变量系统和多变量系统,又有定常和时变之分。凡在其模型描述中含有时变参数的系统称之为时变系统,而凡在其模型描述中全部参数均与时间无关的系统称之为定常系统或时不变系统。而对于定常系统和时变系统,又都有确知和不确定之分。凡其模型完全确定、参数已知的系统称之为确知系统,而在其模型描述中含有未知因素的系统称之为不确定系统。动态系统的上述分类过程示于图0.1.1之中。注意,在该图的各个层次中,每上一层的限定定语仍然作用于下一层。如第六层的单变量系统实为连续、线性、确定性的和定常的并且是确知的单变量系统。这样,在古典控制理论中所研究的系统实际上只是一类非常窄的连续、线性、确定性的和正常的单变量确知系统。另外需要说明的是,此图中各层的排列顺序并不很重要,调换它们的顺序只是改变一些层次的修饰语的顺序。还有,此图在纵向和横向上都可以继续分划下去。

在现代控制理论中,图0.1.1中的任何一个层次中的任一位置所代表的系统均在所研究之列。现代控制理论的内容即是这些系统的分析和设计,包含了非常广泛的内容。

目前,图0.1.1所示的所有系统的分析和设计,均得到了一定程度的讨论。并根据所讨

论的系统类型产生了一系列分支,如线性系统理论、非线性系统理论、分布参数系统理论、随机系统理论(或Kalman滤波与随机最优控制)、广义系统理论、大系统理论等等。另外涉及到不确定系统,还有系统辨识和自适应控制、鲁棒控制理论等一些分支。

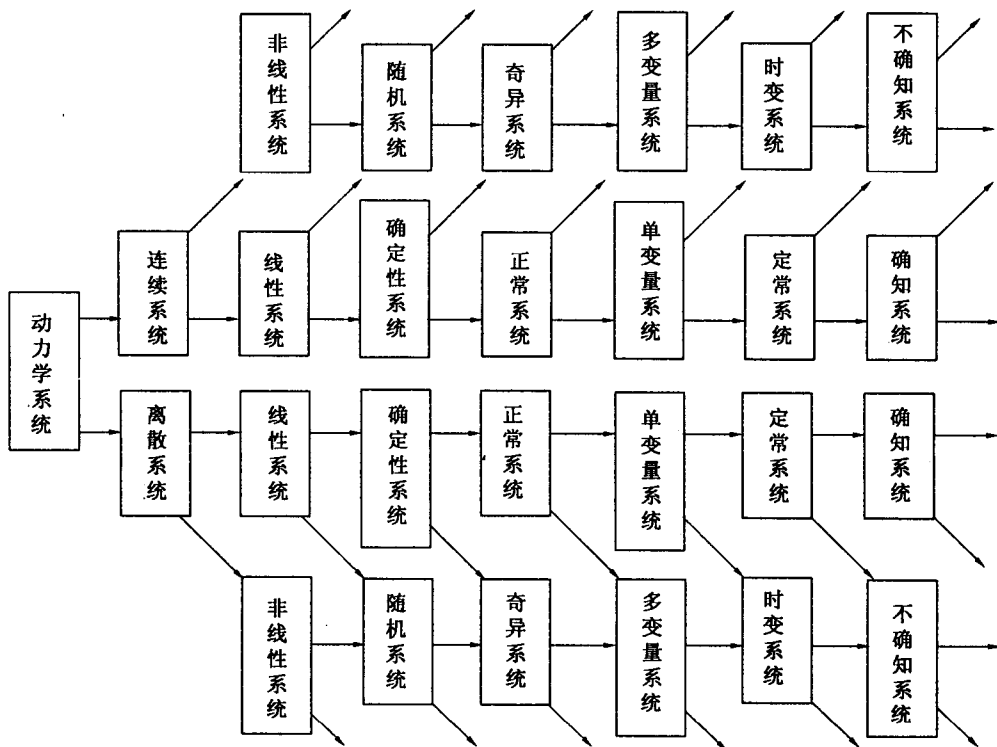


图 0.1.1 动力学系统的分类图

0.2 线性系统理论概述

作为现代控制理论中最基本、最成熟的分支之一——线性系统理论,具有其基本的重要性。它一方面在过程控制、航空、航天等领域的应用中起到了重要作用,另一方面也为现代控制理论的其它分支提供了基础。在进入本书对于线性系统理论的系统探讨之前,我们先对其作一个概括性的介绍,以使读者能在整体上对其有个端貌性的认识。但值得首先说明的是,按照线性系统的定义,广义线性系统和随机线性系统等一些分支均属于线性系统理论范畴。然而按习惯,通常所指的线性系统理论仅涉及到确定性的正常线性系统,而广义线性系统和随机线性系统理论则视为现代控制论的另外的独立分支。

0.2.1 线性系统理论的研究对象

顾名思义,线性系统理论的研究对象为线性动态系统,简称线性系统。它是实际系统的一类理想化了的模型。当描述动态系统的数学方程具有线性属性时,称相应的系统为线性系统。线性系统是一类最简单且研究得最多的动态系统。线性系统的一个基本特征是满