

新编《信息、控制与系统》系列教材

研究生教学用书

教育部研究生工作办公室推荐

Linear System Theory

Second Edition

线性系统理论

(第2版)

郑大钟

Zheng Dazhong



TUP
清华大学出版社



Springer

Linear System Theory

Second Edition

线性系统理论

(第2版)

郑大钟



TUP
清华大学出版社



Springer

(京)新登字 158 号

内 容 简 介

线性系统理论是系统与控制科学领域的一门最为基础的课程。本书按照课程的定位和少而精的原则,以线性系统为基本研究对象,对线性系统的时间域理论和复频率域理论作了系统而全面的论述。主要内容包括系统的状态空间描述和矩阵分式描述,系统特性和运动的时间域分析和复频率域分析,系统基于各类性能指标的时间域综合和复频率域综合等。

本书体系新颖,内容丰富,论述严谨,重点突出。内容取舍上强调基础性和实用性,论述方式上力求符合理工科学学生的认识规律。每章都配有相当数量不同类型的习题。本书可作为理工科大学学生和研究生教材或参考书,也可供科学工作者和工程技术人员学习参考。

版权所有,翻印必究。

本书封面贴有清华大学出版社激光防伪标签,无标签者不得销售。

图书在版编目(CIP)数据

线性系统理论/郑大钟编著. —2版. —北京:清华大学出版社,2002

ISBN 7-302-05501-7

I. 线… II. 郑… III. 线性系统理论—高等学校—教材 IV. O231.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 033946 号

出 版 者: 清华大学出版社(北京清华大学学研大厦,邮编 100084)

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>

责任编辑: 王一玲

印 刷 者: 北京密云胶印厂

发 行 者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 787×1092 1/16 印张: 45.75 字数: 966 千字

版 次: 2002 年 10 月第 2 版 2002 年 10 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-302-05501-7/TP·3236

印 数: 0001~5000

定 价: 46.00 元

新编《信息、控制与系统》系列教材

出版说明

信息、控制与系统学科是在 20 世纪上半叶形成和发展起来的一门新兴技术科学。在人类探索自然和实现现代化的进程中,信息、控制与系统学科的理论、方法和技术始终起着重要的和基础的作用。基于信息、控制与系统科学的自动化的发展和应用水平在一定意义上是一个国家和社会的现代化程度的重要标志之一。本系列教材是关于信息、控制与系统学科所属各个领域的基本理论和前沿技术的一套高等学校系列教材。

本系列教材所涉及的范围包括信号和信息处理、模式识别、知识工程、控制理论、智能控制、过程和运动控制、传感技术、系统工程、机器人控制、计算机控制和仿真、网络化系统、电子技术等方面。主要读者对象为自动控制、工业自动化、计算机科学和技术、电气工程、机械工程、化工工程和热能工程等系科有关的高年级大学生和研究生,以及工作于相应领域和部门的科学工作者和工程技术人员。

10 多年前,清华大学出版社同清华大学自动化系,曾经组编出版过一套《信息、控制与系统》系列教材,产生了较大的社会影响,其中多数著作获得过包括国家级教学成果奖和部委优秀教材奖在内的各种奖励,至今仍为国内众多院校所采用,并被广大相关领域科技人员作为进修和自学读物。我们现在组编的这套新编《信息、控制与系统》系列教材,从一定意义上说,就是先前那套教材的延伸和发展,以反映近些年来学科的发展和在科学研究与教学实践上的新成果和新进展,以适应当前科技发展和教学改革的新形势和新需要。列入这套新编系列教材中的著作,大多是清华大学自动化系开设的课程中经过较长教学实践而形成的,既有多年教学经验和教学改革基础上的新编著的教材,也有部分原系列教材的更新和修订版本。这套新编系列教材总体上仍将保持原系列教材求新与求实的风格,力求反映所属领域的基本理论和新近进展,力求做到学科先进性和教学适用性统一。需要说明的是,此前我们曾以《信息技术丛书》为名组编这套教材,并已出版了若干种著作。现为使“书”和“名”更为相符,这些已出版的著作将在重印或再版时列入这套新编系列教材。

我们希望,这套新编系列教材,既能为在校大学生和研究生的学习提供内容先进、论述系统和教学适用的教材或参考书,也能为广大科学工作者与工程技术人员知识更新与继续学习提供适合的和有价值的进修或自学读物。我们同时要感谢使用本系列教材的广大教师、学生和科技工作者的热情支持,并热忱欢迎提出批评和意见。

新编《信息、控制与系统》系列教材编委会

2002 年 6 月

新编《信息、控制与系统》系列教材编委会

顾 问 李衍达 吴 澄 边肇祺 王桂增
主 编 郑大钟
编 委 徐文立 王 雄 萧德云 杨士元 肖田元
张贤达 周东华 钟宜生 张长水 王书宁
范玉顺 蔡鸿程
责任编辑 王一玲

前言

在系统与amp;控制科学领域内,线性系统是基本的研究对象,并在过去几十年中取得了众多结果和重要进展,已经形成和发展为相当完整和相当成熟的线性系统理论。线性系统理论的重要性首先在于它的基础性,其大量的概念、方法、原理和结论,对于系统与amp;控制理论的许多学科分支,诸如最优控制、非线性控制、鲁棒控制、随机控制、智能控制、系统辨识和参数估计、过程控制、数字滤波和通信系统等,都具有重要和基本的作用,成为学习和研究这些学科必不可少的基础知识。有鉴于此,国内外许多大学都毫无例外地把线性系统理论列为系统与amp;控制科学方向的一门最为基础的课程。

本书是《线性系统理论》一书的新版本。《线性系统理论》自1990年出版以来,由于体系新颖、内容丰富和论述严谨,曾为国内近百所大学广泛采用作为高年级本科生和研究生教材,受到相关院校师生欢迎肯定并已连续8次重印。1993年3月,该书继而由台北儒林图书有限公司出版发行繁体字版本,台湾地区多所大学采用作为研究生教材或参考书。1996年2月,获国家电子工业部第三届全国工科电子类专业优秀教材一等奖。1997年7月,获国家教育委员会国家级教学成果奖二等奖。1999年4月,经国务院学位委员会有关学科组审议通过,列入首批由国家教育部研究生工作办公室推荐的“研究生教学用书”。

《线性系统理论》第2版,在保持第1版的体系结构和基本特色前提下,借鉴10年来课程改革的课程教学上的成果和经验,吸纳10年来教材使用中的反馈意见和有关建议,对全书所有章节的内容安排和论述方式都作了全方位的完全改写。第2版在五个方面对原书作了有价值的发展和改善。一是,增加了若干新的内容,删节了若干繁杂内容,使全书内容更为丰富和完整。二是,突出了问题的背景和提法,使对系统的分析和综合既指出其实际背景又注意问题形式化。三是,强调了贯穿于各章论述中的知识点,将所涉及的重要概念、理论、原理和方法以结论形式组成为各章内容的“知识点”。四是,加强了方法的

计算层面,在注重理论层面严谨性的同时,使所提供的系统分析和系统综合的方法更具实用性。五是,增添了小结和归纳,新版对除绪论以外的每章最后都增写了简要的“小结和评述”,从定位和要点对各章论述的内容作了归纳、梳理和评述。可以相信,上述改善和尝试,将会使本书的内容全面性和教学适用性得到很大提高。

本书以大学理工科高年级本科生和研究生为读者对象,系统地和有重点地阐述分析和综合线性多变量系统的理论与方法。在内容选择和取舍上,力求以少而精的原则论述线性系统理论的基本概念、基本方法和基本结论。全书内容包括线性系统时间域理论和线性系统复频率域理论两个部分,前者以状态空间描述和方法为核心,后者以传递函数矩阵的矩阵分式描述和多项式矩阵理论为基础。这两个部分既有着一定的内在联系和相互衔接,又具有一定程度的相对独立性。线性系统理论中,这两种方法在理论上最具有基础性,而在工程上最富于实用性。而且,它们对于进一步学习和研究线性系统理论的更具一般性和更为抽象的分支,如线性系统几何方法和线性系统代数理论等,也都是必不可少的基础知识。

本书可供理工科高年级本科生和研究生作为教材或参考书使用,也可供系统与控制以及相关领域的广大工程技术人员和科学工作者自学和参考。本书所需的数学基础是微分方程和矩阵运算的基本知识。对于高年级本科生,可选学本书的第一部分,即前5章和第6章的前半部分,作为一个学期课程的教学内容。对于已具有状态空间法基本知识的研究生,则可略去第1章到第5章,以第6章大部分内容和整个第二部分内容,组成一个学期课程的教学内容。书中对绝大多数结论都提供了严格和完全的证明,并在习题中包含了一些证明类型的问题,意在培养和训练正确的逻辑推理能力和技巧。但对于学时较少的情况,讲授中完全可以略去某些证明和推理过程,而着重于解释清楚结论的正确内涵、直观意义和需要满足的条件,引导正确和灵活运用理论去解决现实世界中的问题。此外,书中编选了一批相当数量的习题供选做,它们是构成本书不可缺少的组成部分,对于正确理解和灵活运用书中给出的概念、方法和结论会有重要的帮助。

本书中的一些结果引自于作者的研究论文,这些研究工作曾得到国家自然科学基金的资助,借此机会谨向多年来资助我们研究工作的国家自然科学基金委员会信息科学部表示深切的感谢。在准备第2版的手稿中,研究生张洪担负了全书公式录入和全部附图计算机绘制的繁杂工作,对此深表谢意。此外,还要感谢清华大学出版社责任编辑王一玲同志,感谢她为本书的编辑和出版作了很多细致的工作和提供了很多重要的帮助。

最后,需要指出,尽管作者花了几乎一年的时间来重写第2版,但书中难免仍会有不妥和错误之处,衷心希望读者不吝批评指正。

郑大钟

2001年11月于北京清华大学

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 系统控制理论的研究对象	1
系统	1
动态系统	2
线性系统	4
系统模型	6
1.2 线性系统理论的基本概貌	7
线性系统理论的主要内容	7
线性系统理论的发展过程	9
线性系统理论的主要学派.....	10
1.3 本书的论述范围.....	12

第一部分 线性系统的时间域理论

第 2 章 线性系统的状态空间描述	16
2.1 状态和状态空间.....	16
系统动态过程的两类数学描述.....	16
状态和状态空间的定义.....	18
2.2 线性系统的状态空间描述.....	20
电路系统状态空间描述的列写示例.....	20
机电系统状态空间描述的列写示例.....	22

连续时间线性系统的状态空间描述	24
人口分布问题状态空间描述的列写示例	25
离散时间线性系统的状态空间描述	27
2.3 连续变量动态系统按状态空间描述的分类	28
线性系统和非线性系统	28
时变系统和时不变系统	30
连续时间系统和离散时间系统	31
确定性系统和不确定性系统	32
2.4 由系统输入输出描述导出状态空间描述	32
由输入输出描述导出状态空间描述	32
由方块图描述导出状态空间描述	41
2.5 线性时不变系统的特征结构	42
特征多项式	43
特征值	51
特征向量和广义特征向量	52
2.6 状态方程的约当规范形	56
特征值为两两相异的情形	56
特征值包含重值的情形	59
2.7 由状态空间描述导出传递函数矩阵	64
传递函数矩阵	64
$G(s)$ 基于 (A, B, C, D) 的表达式	67
$G(s)$ 的实用计算关系式	68
2.8 线性系统在坐标变换下的特性	70
坐标变换的几何含义和代数表征	70
线性时不变系统在坐标变换下的特性	72
线性时变系统在坐标变换下的特性	74
2.9 组合系统的状态空间描述和传递函数矩阵	74
子系统的并联	75
子系统的串联	76
子系统的反馈联接	78
2.10 小结和评述	79
习题	80
第3章 线性系统的运动分析	85
3.1 引言	85

运动分析的数学实质	85
解的存在性和惟一性条件	86
零输入响应和零初态响应	87
3.2 连续时间线性时不变系统的运动分析	88
系统的零输入响应	88
矩阵指数函数的性质	90
矩阵指数函数的算法	91
系统的零初态响应	95
系统状态运动规律的基本表达式	98
基于特征结构的状态响应表达式	98
3.3 连续时间线性时不变系统的状态转移矩阵	102
状态转移矩阵和基本解阵	102
基于状态转移矩阵的系统响应表达式	104
状态转移矩阵的特性	105
3.4 连续时间线性时不变系统的脉冲响应矩阵	106
脉冲响应矩阵	106
脉冲响应矩阵和状态空间描述	108
脉冲响应矩阵和传递函数矩阵	109
3.5 连续时间线性时变系统的运动分析	110
状态转移矩阵	111
系统的状态响应	112
脉冲响应矩阵	115
$A(t)$ 为周期阵的线性时变系统的状态运动分析	116
3.6 连续时间线性系统的时间离散化	118
问题的提出	118
基本约定	119
基本结论	121
3.7 离散时间线性系统的运动分析	123
迭代法求解状态响应	124
状态响应的解析关系式	125
脉冲传递函数矩阵	129
3.8 小结和评述	130
习题	132

第 4 章 线性系统的能控性和能观测性	135
4.1 能控性和能观测性的定义	135
对能控性和能观测性的直观讨论	135
能控性的定义	137
能观测性的定义	139
4.2 连续时间线性时不变系统的能控性判据	140
格拉姆矩阵判据	140
秩判据	142
PBH 判据	144
约当规范形判据	147
能控性指数	150
4.3 连续时间线性时不变系统的能观测性判据	152
格拉姆矩阵判据	152
秩判据	153
PBH 判据	155
约当规范形判据	156
能观测性指数	158
4.4 连续时间线性时变系统的能控性和能观测性判据	160
能控性判据	160
能观测性判据	163
4.5 离散时间线性系统的能控性和能观测性判据	165
时变系统的能控性和能达性判据	165
时不变系统的能控性和能达性判据	168
时变系统的能观测性判据	171
时不变系统的能观测性判据	172
4.6 对偶性	174
对偶系统	174
对偶性原理	176
4.7 离散化线性系统保持能控性和能观测性的条件	177
问题的提法	177
能控性和能观测性保持条件	178
4.8 能控规范形和能观测规范形：单输入单输出情形	182
能控性能观测性在线性非奇异变换下的属性	182
能控规范形	183
能观测规范形	186

4.9	能控规范形和能观测规范形：多输入多输出情形	188
	搜索线性无关列或行的方案	188
	旺纳姆能控规范形	191
	旺纳姆能观测规范形	195
	龙伯格能控规范形	196
	龙伯格能观测规范形	199
4.10	连续时间线性时不变系统的结构分解	200
	按能控性的系统结构分解	200
	按能观测性的系统结构分解	205
	系统结构的规范分解	206
4.11	小结和评述	208
	习题	209
第5章	系统运动的稳定性	213
5.1	外部稳定性和内部稳定性	213
	外部稳定性	213
	内部稳定性	216
	内部稳定性和外部稳定性的关系	217
5.2	李亚普诺夫意义下运动稳定性的一些基本概念	218
	李亚普诺夫第一方法和第二方法	218
	自治系统、平衡状态和受扰运动	219
	李亚普诺夫意义下的稳定	221
	渐近稳定	222
	不稳定	223
5.3	李亚普诺夫第二方法的主要定理	224
	大范围渐近稳定的判别定理	224
	小范围渐近稳定的判别定理	230
	李亚普诺夫意义下稳定的判别定理	231
	不稳定的判别定理	231
5.4	构造李亚普诺夫函数的规则化方法	232
	变量梯度法	232
	克拉索夫斯基方法	236
5.5	连续时间线性系统的状态运动稳定性判据	238
	线性时不变系统的稳定判据	238
	线性时变系统的稳定判据	242

5.6	连续时间线性时不变系统稳定自由运动的衰减性能的估计	244
	衰减系数	244
	计算最小衰减系数 η_{\min} 的关系式	245
	自由运动衰减快慢的估计	247
5.7	离散时间系统状态运动的稳定性及其判据	248
	离散时间非线性时不变系统的李亚普诺夫主稳定性定理	248
	离散时间线性时不变系统的稳定判据	249
5.8	小结和评述	250
	习题	251
第6章	线性反馈系统的时间域综合	254
6.1	引言	254
	综合问题的提法	254
	性能指标的类型	255
	研究综合问题的思路	256
	工程实现中的一些理论问题	257
6.2	状态反馈和输出反馈	258
	状态反馈	258
	输出反馈	260
	状态反馈和输出反馈的比较	262
6.3	状态反馈极点配置: 单输入情形	263
	问题的提法	264
	期望闭环极点组	264
	极点配置定理	267
	极点配置算法	268
6.4	状态反馈极点配置: 多输入情形	270
	系统的循环性	270
	极点配置定理	273
	极点配置算法	273
	状态反馈对系统传递函数矩阵零点的影响	278
6.5	输出反馈极点配置	281
6.6	状态反馈镇定	283
6.7	状态反馈动态解耦	285
	系统和假定	285
	问题的提法	286

系统的结构特征量	287
可解耦条件	291
解耦控制综合算法	294
6.8 状态反馈静态解耦	301
问题的提法	301
可解耦条件	303
静态解耦控制综合算法	305
6.9 跟踪控制和扰动抑制	305
问题的提法	305
参考输入和扰动的信号模型	307
无静差跟踪控制系统	310
6.10 线性二次型最优控制：有限时间情形	317
LQ 问题	317
有限时间 LQ 问题的最优解	319
6.11 线性二次型最优控制：无限时间情形	324
无限时间 LQ 问题的最优解	324
稳定性和指数稳定性	326
最优调节系统的频率域条件	328
最优调节系统的鲁棒性	331
最优跟踪问题	334
矩阵黎卡提方程的求解	336
6.12 全维状态观测器	337
状态重构和状态观测器	337
全维状态观测器：综合方案 I	338
全维状态观测器：综合方案 II	342
6.13 降维状态观测器	346
降维状态观测器的基本特性	346
降维状态观测器：综合方案 I	347
降维状态观测器：综合方案 II	351
6.14 Kx -函数观测器	355
6.15 基于观测器的状态反馈控制系统的特性	361
基于观测器的状态反馈系统的构成	361
基于观测器的状态反馈系统的特性	362
综合举例	365
具有观测器状态反馈系统和具有补偿器输出反馈系统的等价性	368

6.16 小结和评述	369
习题	371

第二部分 线性系统的复频率域理论

第7章 数学基础：多项式矩阵理论	379
7.1 多项式矩阵	379
多项式	379
多项式矩阵及其属性	380
7.2 奇异和非奇异	381
7.3 线性相关和线性无关	382
7.4 秩	384
7.5 单模矩阵	385
7.6 初等变换	387
第一种初等变换	387
第二种初等变换	389
第三种初等变换	390
单模变换和初等变换	392
7.7 埃尔米特形	393
埃尔米特形的形式	393
埃尔米特形的算法	394
埃尔米特形的性质	395
7.8 公因子和最大公因子	396
公因子和最大公因子的定义	397
最大公因子的构造定理	397
最大公因子的性质	399
7.9 互质性	402
右互质和左互质	402
互质性的常用判据	402
对最大公因子构造关系式性质的进一步讨论	407
7.10 列次数和行次数	409
列次数和行次数的定义	409
列次表达式和行次表达式	410
7.11 既约性	411
列既约性和行既约性	412

既约性判据	412
非既约矩阵的既约化	415
7.12 史密斯形	416
史密斯形的形式	416
史密斯形的特性	418
7.13 波波夫形	422
波波夫形的形式	422
波波夫形的基本特性	424
波波夫形的算法	426
7.14 矩阵束和克罗内克尔形	431
矩阵束	431
克罗内克尔形	432
7.15 小结和评述	436
习题	437
第 8 章 传递函数矩阵的矩阵分式描述	441
8.1 矩阵分式描述	441
右 MFD 和左 MFD	441
MFD 的特性	442
8.2 矩阵分式描述的真性和严真性	445
真性和严真性	445
真性和严真性的判别准则	446
8.3 从非真矩阵分式描述导出严真矩阵分式描述	449
基本结论	449
确定严真 MFD 的算法	450
一类特殊情形的多项式矩阵除法问题	451
8.4 不可简约矩阵分式描述	453
不可简约 MFD	453
不可简约 MFD 的基本特性	453
8.5 确定不可简约矩阵分式描述的算法	458
基于最大公因子的算法	458
基于最大公因子构造定理的算法	460
由右可简约 MFD 确定左不可简约 MFD 的算法	461
8.6 规范矩阵分式描述	463
埃尔米特形 MFD	463

波波夫形 MFD	464
8.7 小结和评述	465
习题	466
第 9 章 传递函数矩阵的结构特性	469
9.1 史密斯-麦克米伦形	469
史密斯-麦克米伦形及其构造定理	469
史密斯-麦克米伦形的基本特性	472
9.2 传递函数矩阵的有限极点和有限零点	474
极点和零点的基本定义	475
极点和零点的推论性定义	476
对零点的直观解释	479
9.3 传递函数矩阵的结构指数	480
结构指数	480
对结构指数的几点讨论	481
9.4 传递函数矩阵在无穷远处的极点和零点	482
无穷远处的极点和零点	482
无穷远处的结构指数	484
9.5 传递函数矩阵的评价值	485
传递函数矩阵在有限复平面上的评价值	485
传递函数矩阵在无穷远处的评价值	490
传递函数矩阵的史密斯-麦克米伦形的合成表达式	492
9.6 传递函数矩阵的零空间和最小多项式基	493
零空间	493
最小多项式基	494
最小多项式基判据	498
9.7 传递函数矩阵的亏数	500
亏数	501
亏数和极点零点不平衡性	501
亏数和最小指数	503
9.8 小结和评述	506
习题	507
第 10 章 传递函数矩阵的状态空间实现	510
10.1 实现的基本概念和基本属性	510