



全国高等学校自动化专业系列教材
教育部高等学校自动化专业教学指导分委员会牵头规划

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 编著

Zheng Dazhong

清华大学出版社



全国高等学校自动化专业系列教材
教育部高等学校自动化专业教学指导分委员会牵头规划

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 编著

Zheng Dazhong

清华大学出版社

北 京

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。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

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,2002.10 (2013.7重印)

(全国高等学校自动化专业系列教材)

ISBN 978-7-302-05501-3

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

责任编辑:王一玲

责任印制:何 芊

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 刷 者:清华大学印刷厂

装 订 者:三河市兴旺装订有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:175mm×245mm

印 张:46.5

字 数:966千字

版 次:2002年10月第2版

印 次:2013年7月第14次印刷

印 数:37501~39500

定 价:59.50元

产品编号:005501-02/TP

出版说明

《全国高等学校自动化专业系列教材》



为适应我国对高等学校自动化专业人才培养的需要,配合各高校教学改革的进程,创建一套符合自动化专业培养目标和教学改革要求的新型自动化专业系列教材,“教育部高等学校自动化专业教学指导分委员会”(简称“教指委”)联合了“中国自动化学会教育工作委员会”、“中国电工技术学会高校工业自动化教育专业委员会”、“中国系统仿真学会教育工作委员会”和“中国机械工业教育协会电气工程及自动化学科委员会”四个委员会,以教学创新为指导思想,以教材带动教学改革为方针,设立专项资助基金,采用全国公开招标方式,组织编写出版了一套自动化专业系列教材——《全国高等学校自动化专业系列教材》。

本系列教材主要面向本科生,同时兼顾研究生;覆盖面包括专业基础课、专业核心课、专业选修课、实践环节课和专业综合训练课;重点突出自动化专业基础理论和前沿技术;以文字教材为主,适当包括多媒体教材;以主教材为主,适当包括习题集、实验指导书、教师参考书、多媒体课件、网络课程脚本等辅助教材;力求做到符合自动化专业培养目标、反映自动化专业教育改革方向、满足自动化专业教学需要;努力创造使之成为具有先进性、创新性、适用性和系统性的特色品牌教材。

本系列教材在“教指委”的领导下,从2004年起,通过招标机制,计划用3~4年时间出版50本左右教材,2006年开始陆续出版问世。为满足多层次、多类型的教学需求,同类教材可能出版多种版本。

本系列教材的主要读者群是自动化专业及相关专业的大学生和研究生,以及相关领域和部门的科学工作者和工程技术人员。我们希望本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、论述系统和适于教学的教材或参考书,也能为广大科学工作者和工程技术人员知识更新与继续学习提供适合的参考资料。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,并欢迎提出批评和意见。

《全国高等学校自动化专业系列教材》编审委员会

2005年10月于北京

《全国高等学校自动化专业系列教材》编审委员会

顾问：（按姓氏笔画）

王行愚(华东理工大学)	冯纯伯(东南大学)
孙优贤(浙江大学)	吴启迪(同济大学)
张嗣瀛(东北大学)	陈伯时(上海大学)
陈翰馥(中国科学院)	郑大钟(清华大学)
郑南宁(西安交通大学)	韩崇昭(西安交通大学)

主任委员： 吴 澄(清华大学)

副主任委员： 赵光宙(浙江大学) 萧德云(清华大学)

委员：（按姓氏笔画）

王 雄(清华大学)	方华京(华中科技大学)
史 震(哈尔滨工程大学)	田作华(上海交通大学)
卢京潮(西北工业大学)	孙鹤旭(河北工业大学)
刘建昌(东北大学)	吴 刚(中国科技大学)
吴成东(沈阳建筑工程学院)	吴爱国(天津大学)
陈庆伟(南京理工大学)	陈兴林(哈尔滨工业大学)
郑志强(国防科技大学)	赵 曜(四川大学)
段其昌(重庆大学)	程 鹏(北京航空航天大学)
谢克明(太原理工大学)	韩九强(西安交通大学)
褚 健(浙江大学)	蔡鸿程(清华大学出版社)
廖晓钟(北京理工大学)	戴先中(东南大学)

工作小组（组长）： 萧德云(清华大学)

（成员）：	陈伯时(上海大学)	郑大钟(清华大学)
	田作华(上海交通大学)	赵光宙(浙江大学)
	韩九强(西安交通大学)	陈兴林(哈尔滨工业大学)
	陈庆伟(南京理工大学)	

（助理）： 郭晓华(清华大学)

责任编辑： 王一玲(清华大学出版社)

序

FOREWORD >>>>

自动化学科有着光荣的历史和重要的地位，20世纪50年代我国政府就十分重视自动化学科的发展和自动化专业人才的培养。五十多年来，自动化科学技术在众多领域发挥了重大作用，如航空、航天等，两弹一星的伟大工程就包含了许多自动化科学技术的成果。自动化科学技术也改变了我国工业整体的面貌，不论是石油化工、电力、钢铁，还是轻工、建材、医药等领域都要用到自动化手段，在国防工业中自动化的作用更是巨大的。现在，世界上有很多非常活跃的领域都离不开自动化技术，比如机器人、月球车等。另外，自动化学科对一些交叉学科的发展同样起到了积极的促进作用，例如网络控制、量子控制、流媒体控制、生物信息学、系统生物学等学科就是在系统论、控制论、信息论的影响下得到不断的发展。在整个世界已经进入信息时代的背景下，中国要完成工业化的任务还很重，或者说我们正处在后工业化的阶段。因此，国家提出走新型工业化的道路和“信息化带动工业化，工业化促进信息化”的科学发展观，这对自动化科学技术的发展是一个前所未有的战略机遇。

机遇难得，人才更难得。要发展自动化学科，人才是基础、是关键。高等学校是人才培养的基地，或者说人才培养是高等学校的根本。作为高等学校的领导和教师始终要把人才培养放在第一位，具体对自动化系或自动化学院的领导和教师来说，要时刻想着为国家关键行业和战线培养和输送优秀的自动化技术人才。

影响人才培养的因素很多，涉及教学改革方方面面，包括如何拓宽专业口径、优化教学计划、增强教学柔性、强化通识教育、提高知识起点、降低专业重心、加强基础知识、强调专业实践等，其中构建融会贯通、紧密配合、有机联系的课程体系，编写有利于促进学生个性发展、培养学生创新能力的教材尤为重要。清华大学吴澄院士领导的《全国高等学校自动化专业系列教材》编审委员会，根据自动化学科对自动化技术人才素质与能力的需求，充分吸取国外自动化教材的优势与特点，在全国范围内，以招标方式，组织编写了这套自动化专业系列教材，这对推动高等学校自动化专业发展与人才培养具有重要

的意义。这套系列教材的建设有新思路、新机制,适应了高等学校教学改革与发展的新形势,立足创建精品教材,重视实践性环节在人才培养中的作用,采用了竞争机制,以激励和推动教材建设。在此,我谨向参与本系列教材规划、组织、编写的老师,致以诚挚的感谢,并希望该系列教材在全国高等学校自动化专业人才培养中发挥应有的作用。

吴世迪 教授

2005年10月于教育部

《全国高等学校自动化专业系列教材》编审委员会在对国内外部分大学有关自动化专业的教材做深入调研的基础上,广泛听取了各方面的意见,以招标方式,组织编写了一套面向全国本科生(兼顾研究生)、体现自动化专业教材整体规划和课程体系、强调专业基础和理论联系实际的系列教材,自2006年起将陆续面世。全套系列教材共50多本,涵盖了自动化学科的主要知识领域,大部分教材都配置了包括电子教案、多媒体课件、习题辅导、课程实验指导书等立体化教材配件。此外,为强调落实“加强实践教育,培养创新人才”的教学改革思想,还特别规划了一组专业实验教程,包括《自动控制原理实验教程》、《运动控制实验教程》、《过程控制实验教程》、《检测技术实验教程》和《计算机控制系统实验教程》等。

自动化科学技术是一门应用性很强的学科,面对的是各种各样错综复杂的系统,控制对象可能是确定性的,也可能是随机性的;控制方法可能是常规控制,也可能需要优化控制。这样的学科专业人才应该具有什么样的知识结构,又应该如何通过专业教材来体现,这正是“系列教材编审委员会”规划系列教材时所面临的问题。为此,设立了《自动化专业课程体系结构研究》专项研究课题,成立了由清华大学萧德云教授负责,包括清华大学、上海交通大学、西安交通大学和东北大学等多所院校参与的联合研究小组,对自动化专业课程体系结构进行深入研究,提出了按“控制理论与工程、控制系统与技术、系统理论与工程、信息处理与分析、计算机与网络、软件基础与工程、专业课程实验”等知识板块构建的课程体系结构。以此为基础,组织规划了一套涵盖几十门自动化专业基础课程和专业课程的系列教材。从基础理论到控制技术,从系统理论到工程实践,从计算机技术到信号处理,从设计分析到课程实验,涉及的知识单元多达数百个、知识点几千个,介入的学校50多所、参与的教授120多人,是一项庞大的系统工程。从编制招标要求、公布招标公告,到组织投标和评审,最后商定教材大纲,凝聚着全国百余名教授的心血,为的是编写出版一套具有一定规模、富有特色的,既考虑研究型大学,又考虑应用型大学的自动化专业创新型系列教材。

然而,如何进一步构建完善的自动化专业教材体系结构?如何建设基础知识与最新知识有机融合的教材?如何充分利用现代技术,适应现代大学生的接受习惯,改变教材单一形态,建设数字化、电子化、网络化等多元形态、开放性的“广义教材”?等等,这些都还有待我们进行更深入的研究。

本套系列教材的出版,对更新自动化专业的知识体系、改善教学条件、创造个性化的教学环境,一定会起到积极的作用。但是由于受各方面条件所限,本套教材从整体结构到每本书的知识组成都可能存在许多不当甚至谬误之处,还望使用本套教材的广大教师、学生及各界人士不吝批评指正。

吴俊 院士

2005年10月于清华大学



在系统与控制科学领域内，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年来课程改革和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



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 $\eta_{\min}$ 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