

模拟、数字信号 与系统

Analog and Digital Signals and Systems

[美] 饶·亚历伽达(R.K.Rao Yarlagadda) 著

曾周末 等译



模拟、数字信号与系统

[美] 饶·亚历伽达 (R. K. Rao Yarlagadda) 著
曾周末 林 凌 栗大超 杨春梅 许宝忠 译

机械工业出版社

本书系统讨论模拟与离散信号的分析方法,讨论模拟与离散系统的分析和综合方法。主要通过学习基本概念,通过基本训练检验学习情况等保证对内容的理解,使读者掌握信号与系统的基本知识,并不强调对基本定理的理论证明,也最大限度地避免复杂的数学推导。

本书内容突出信号与系统的基本知识,实用性强,适合作为电子信息工程、仪器工程、自动化、计算机、光电信息工程、生物医学工程等专业的教学或自学用书,也可供相关领域的工程技术和科学研究人员使用。

Translation from the English Language edition:

Analog and Digital Signals and Systems

by R. K. Rao Yarlagadda

©Springer Science + Business Media, LLC 2010

All Rights Reserved

This title is published in china by China Machine Press with license from the Springer. This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong SAR, Macao SAR and TaiWan. Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书由 Springer 授权机械工业出版社在中国境内(不包括香港、澳门特别行政区以及台湾地区)出版发行。未经许可之出口,视为违反著作权法,将受法律之制裁。

北京市版权局著作权合同登记 图字:01-2011-3818

图书在版编目(CIP)数据

模拟、数字信号与系统/(美)饶·亚历伽达(R. K. Rao Yarlagadda)

著;曾周末等译. —北京:机械工业出版社,2016.12

书名原文:Analog and Digital Signals and Systems

ISBN 978-7-111-56856-8

I. ①模… II. ①饶…②曾… III. ①模拟信号-信号系统-教材
②数字信号-信号系统-教材 IV. ①TN911.7

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第107017号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:王小东 责任编辑:王小东

责任印制:孙炜 责任校对:任秀丽 李锦莉

北京京丰印刷厂印刷

2017年8月第1版·第1次印刷

184mm×260mm·40印张·946千字

标准书号:ISBN 978-7-111-56856-8

定价:98.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线:010-88379833

读者购书热线:010-88379649

网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

金书网:www.golden-book.com

封面防伪标均为盗版

译者的话

Rao Yarlagadda 博士退休后花了三年多时间完成了《模拟、数字信号与系统》书稿，这是他教学“信号与系统”课程近 40 年的结晶。全书有其独到的特点：强调认识客观事物的过程，不追求内容体系的完整性，把复杂的内容展开为多个简单部分的有机组合，读起来有一种轻松感，易于接受；很好地体现了其关注“基本概念、概念引入、概念的物理实质、概念应用”的指导思想，不强调数学证明，更重视定义、定理及有关概念的物理意义，重视相关内容的实际应用，带有很多涉及滤波器、通信系统、数字信号处理及其快速算法的知识点，内容丰富，可以作为多门课程的教材和教学参考书；模拟和数字两部分内容得到了很好的融合，整体性强；时域分析的内容讨论不多，但比较重视卷积和相关分析；强调 MATLAB 的工具作用，避免学生的盲从；例题、习题丰富，参考文献引用具体，使用方便。

Rao Yarlagadda 博士非常关注中文版的出版，并专门为中文版作序，与大家分享他的教学经验，他在教学过程所遇到的困扰，他对教学内容组织的所思所想，他对教学方法的探索，他对学生学习的引导，无疑都会给我们启示。“信号与系统”课程是学生从数理基础学习向专业课程学习转变过程中的一个关键环节，在掌握学习内容的同时，更重要的是训练获取知识和应用知识的能力，学习调整学习方法，准确把握数学工具与工程应用的关系。课程的全部内容都能找到数学公式支撑，系统性极强，但如果仅停留在公式上，教与学都索然无味，一旦走进应用的天地，就会感受到无穷乐趣。

全书由曾周末组织翻译并统稿，杨春梅翻译第 1、2 章，林凌翻译第 3、4 章，栗大超翻译第 6、7 章，许宝忠翻译第 8、9 章，曾周末翻译第 5、10 章，沙洲、张昊、贾乐成、芮小博绘制了部分插图，张宇审定了全书插图。

由于水平所限，错误和疏漏之处在所难免，恳请读者批评指正。

译者

致中文版读者

非常高兴能有机会与本书的中文版读者分享我的写作过程和教学经历。

写本书的初衷：

编写教材是教授们期望做的事情，耗时、辛劳但非常有价值，它凝聚着作者对教学内容的所思所想。在我进行信号与系统相关课程教学的几十年中，常为下面的问题所困扰：第一，信号与系统分析的内容理论体系非常完整，应用对象涉及医学、经济、地震、语音、图像等众多领域，几乎无所不包，如何组织内容来平衡教学中对理论和应用两方面的需求？第二，听课者不只来自电子工程专业，还有数学、统计、物理、计算机，甚至历史、心理学等专业的学生，如何保证所有的参与者都能有所收获？我留下了数百页的教学笔记，萌发了写本书的冲动。课程内容的理论性、系统性强，但不能仅仅停留在基本概念和数学描述上，概念的物理意义和概念的应用更为重要，本书把理论问题分割为许多基本单元，从应用的角度去阐述，需要什么讨论什么，并用超过 400 道例题来支撑达到这个目标。400 多道习题都是经过精心挑选的，能帮助学生巩固对学习内容的理解和掌握。引用 160 多条参考书目介绍学习内容所涉及理论或应用的出处，方便读者查阅，全部文献都是本人认真阅读过的。信号分析理论的应用还在进一步拓展中。

学生是最好的评论员。如果有学生不明白手稿中某个特定的概念或例子，我就会对内容组织结构和表述方式进行调整，这是改善教材质量的有效方法。学生们的思维是积极的、开放性的，他们对问题的创新解决方案丰富了案例，共享这些创新理念，使本书变得更有价值。

课程教学经验：

对一个工科学生而言，学习过程需要关注四个方面：基本概念、概念的引入、概念的物理实质、概念的应用，不可偏颇。本课程中，基本概念可能都是数学描述，概念的应用就是面向工程的东西，只停留在数学层面显然不是课程的教学目标，但过分强调应用就会失去一般性。学生们往往走向两个极端，喜欢数学的同学注重内容的理论体系，记得住，喜欢动手的同学注重内容的工程背景，看得见。教师的引导至关重要。

具有很强的基础知识背景和运用知识的能力同样重要，否则任何事情都无法胜任。本课程需要矩阵、极限、微积分、微分方程等数学基础，程度不一定很高，但希望学生不仅能利用这些基础知识解决课程中的问题，还能感受到应用基础知识的成功、体验豁然开朗的快乐。

学生厌恶广泛阅读，只是想了解足够的材料取得学分，获得一份工作，抱着书想，不喜欢使用纸和铅笔，这是我最感头痛的事。我会列举很多问题，让学生们挑选，鼓励学生对课程中特定的、感兴趣的主题进行讨论、研究、交流，引导他们思考，引导他们投入，引导他们的兴趣。有强烈的动机是学好课程内容的前提，没有兴趣、没有问题，就只能让课程内容永远停留在课本上，但一旦有了他们的积极参与，挡都挡不住。

在使用参考资料的过程中，我鼓励学生用自己的话对学习内容进行总结、归纳，重要步骤进行细化和完善。一个学期之后，学生应该有三个方面的收获：学习内容的收获，数学工具的收获，分析方法的收获。如果学生对电路的实现感兴趣，就提供条件让他去感受、去思考。

第一次课,我会给学生提供详细的教学大纲,包括课程内容、教学进程、作业、实验、考试安排、办公地点和答疑时间。我会要求学生做笔记和进行分组交流,这是帮助他们今后走上工作岗位的必要准备,因为任何时候你都不可能带着教材在会场上寻找答案,把课本上的东西变成你的所有才是唯一解决方案,这使我与学生的沟通非常融洽。

我通常安排三次1小时的单元测验和一次综合考试,允许学生带数页纸的学习笔记,希望他们认真总结、归纳学习内容,列表、画图、统计、比较都是好的学习习惯。我不喜欢闭卷考试,死记硬背不是我的教学科目。我会认真记录学生的考试成绩,做成评估曲线,比较不同年级学生的学习情况,供调整考试内容、安排教学进程时参考。

学会使用 MATLAB 工具是明智的选择,它能帮助你去感受信号和系统灵巧的一面。你会发现,这其实不难。

各章内容概要:

第1章介绍信号的基本概念。用西瓜测试、雷达测量等一些有趣的例子引入信号分析与日常生活的密切联系。冲激信号和周期信号的概念是本章重点,熟练掌握相关数学工具对学好本课程非常重要。

第2章讨论信号的卷积、自相关和互相关。利用这些概念可评价信号的信噪比而不必涉及概率理论。任意信号的重复卷积可以形成钟型高斯脉冲,这一现象称为中心极限定理。在光学设计和地震信号分析等实际应用中,解卷积能够从响应信号中分离所需信息。

第3章介绍正交函数的基本概念和信号的近似表示方法,介绍信号近似表示时的误差控制措施。傅里叶级数的三种形式,复指数形式、三角形式和谐波形式都是信号正交分解的结果。讨论傅里叶级数的性质、傅里叶级数的界和收敛范围、吉布斯现象、对称信号的傅里叶级数等。

第4章从周期信号的傅里叶级数自然拓展到非周期信号的傅里叶变换,讨论傅里叶变换的性质、傅里叶变换的不确定性原理、信号带宽等。介绍通信系统中常用的几个信号变换。傅里叶级数和傅里叶变换是本书的核心内容。

第5章介绍与傅里叶变换有关的其他信号变换形式,包括正弦变换、余弦变换、哈特利变换、希尔伯特变换、单边拉普拉斯变换和双边拉普拉斯变换,讨论拉普拉斯变换与其他变换的关系。通常在面向工科学生的教学过程中,讨论拉普拉斯变换多,讨论傅里叶变换少。解析信号的概念在第10章讨论的模拟调制方案会有应用。

第6章介绍线性时不变系统和时变系统的基本概念,重点讨论线性系统的冲激响应和系统的稳定性,用实例介绍判断线性系统稳定性的方法——罗斯准则。讨论系统带宽的描述,包括3dB带宽、噪声带宽、方均根带宽。利用系统的相频响应和延迟响应简单讨论无失真传输的概念。现实中大多数系统都是非线性的,了解非线性系统首先需要将其化简为线性系统。利用基尔霍夫定理和电阻、电容、电感元件讨论滤波器电路的构成和基本特性,包括低通、高通、带通、带阻滤波器和延迟线滤波器,这都是最基本的电子电路。

第7章介绍简单电路及其灵敏度分析的基本概念,讨论电路参数与电路性能的关系。讨论伯德图及其用 MATLAB 绘制伯德图,伯德图在控制领域应用广泛。讨论利用幅频响应和相频响应逼近的滤波器设计方法,用巴特沃斯函数、契比雪夫函数和贝塞尔函数描述低通滤波器,由低通滤波器函数变换为高通、带通、带阻滤波器函数是规范的设计方法。讨论二端口网络模型,包括阻抗参数模型、导纳参数模型、混合参数模型、G 参数模型和级联参数模

型等,讨论受控源模型。利用运算放大器实现二阶传递函数,用实例讨论有源滤波器的分析与综合方法。

第8章介绍离散信号及其运算,利用采样定理建立从连续时间信号到离散信号的联系,讨论广义傅里叶级数插值公式,离散时间傅里叶变换(DTFT)及其性质,离散傅里叶变换(DFT)及其性质,离散卷积、离散相关,插值和抽取等。

第9章从分析离散傅里叶变换(DFT)算法的计算量要求入手,讨论离散傅里叶变换的快速算法,比较时间抽取、频率抽取快速傅里叶变换(FFT)算法与直接计算离散傅里叶变换(DFT)的效率。利用循环矩阵计算离散卷积和离散相关。讨论双边 z 变换与离散时间傅里叶变换(DTFT)的关系,利用留数法、部分分式分解、幂级数展开法求反 z 变换。单边 z 变换及其性质,利用单边 z 变换解线性差分方程。离散线性时不变系统的传递函数,离散系统的稳定性分析。讨论基于脉冲不变法和双线性变换法的数字滤波器设计方法,介绍数字低通、高通、带通、带阻滤波器。

第10章介绍模拟调制与解调的基本概念,包括双边带调制、单边带调制、残留边带调制的理论、调制与解调的实现、调制信号的功率、带宽、调制效率、超外差调幅(AM)接收机等。介绍角度调制的基本概念,包括角度调制信号的非线性特征、贝塞尔函数与角度调制信号的谱、角度调制信号的解调、超外差接收机、调幅(AF)调频(FM)立体声复用等。简单介绍信道非线性或多径效应引起的传输失真。简单介绍多路复用技术、脉冲编码调制(PCM)和二进制数字传输的概念。

附录A介绍矩阵代数的基本概念。包括矩阵描述、逆矩阵、矩阵方程的解、对称矩阵、特征根和特征向量、奇异值分解、广义逆矩阵、超定方程和欠定方程的最小二乘解、多项式插值和拉格朗日插值等。矩阵代数在数字信号处理中应用广泛。

附录B介绍数字信号处理的MATLAB应用程序,包括sinc函数、快速傅里叶变换、卷积、傅里叶级数、多项式的根、部分分式展开、伯德图、冲激响应和阶跃响应等。讨论如何构造MATLAB调用函数。在线MATLAB教程能为学生提供学习MATLAB编程知识的链接。MATLAB是数字信号处理的通用工具,这些材料足以引导学生成为熟练的应用者。

附录C编列了课程学习过程中常用的数学公式,包括三角恒等式、对数、复数、微分公式、积分公式、求和公式、级数和特殊常数。

希望这本书对追求信号与系统知识的学生及专业人士有所帮助。

致谢:

感谢天津大学曾周末教授和他的同事们,感谢机械工业出版社的朋友,有了他们的付出,才可能有本书中文版的问世。

R. K. Rao Yarlagadda

Professor Emeritus

School of Electrical and Computer Engineering

Oklahoma State University

Stillwater, OK 74075

2014年4月2日

前 言

本书系统讨论模拟与离散信号的综合方法,介绍模拟通信的基本知识,在内容组织上融入本人在俄克拉何马州立大学40年的教学心得,涉及三门课程:“信号分析”(三年级第二学期课程)、“有源滤波器”(四年级第一学期课程)、“数字信号处理”(四年级第二学期课程)。结合选用教材,本人多次使用这些教学资料讲授上述三门课程。本科学习阶段,大多数信号分析课程并不要求很强的概率论基础。

全书并不强调对基本定理的理论证明,也最大限度地避免复杂的数学推导,主要通过以下三个环节保证学生对基本内容的理解:

- 1) 学习基本概念。
- 2) 通过基本训练检验学习情况。
- 3) 利用仿真工具判定结果的正确性。

全书提供了400多个例题、400多个练习题和160余条参考书目,以方便学生学习。部分习题附有解答提示,感兴趣的教师可以通过出版商得到习题解答手册。

各章概要

第1章介绍相关专业大学生在先修课程中已经了解的基本概念,包括奇异信号、周期信号等。第2章介绍周期信号和非周期信号的卷积和相关运算。第3章讨论如何用一个基本函数集合来近似描述任意信号,即傅里叶级数展开,介绍三种基本的傅里叶级数展开形式,讨论傅里叶级数的运算性质及傅里叶级数的收敛性。第4章由傅里叶级数引出傅里叶变换,傅里叶级数和傅里叶变换是本书的主要内容。第5章介绍与傅里叶变换有关的其他信号变换形式,包括拉普拉斯变换、正弦和余弦变换、哈特利变换和希尔伯特变换。第6章讨论系统分析的基本概念,包括线性时不变系统、稳定性、冲击响应、传递函数、线性非线性系统以及简单的滤波电路等。第7章用经典的巴特沃斯、契比雪夫和贝塞尔模型描述滤波器,讨论幅频和相频特性逼近的滤波器设计方法,介绍低通、高通、带通、带阻滤波器和全通网络等有源滤波器的分析与综合实例。第8章首先介绍采样理论及理想采样信号的傅里叶变换,建立从连续时间信号到离散时间信号的联系,详细讨论基本离散信号、离散时间傅里叶级数、离散时间傅里叶变换和离散傅里叶变换。第9章介绍离散傅里叶变换的快速实现、离散卷积和离散相关,讨论 z 变换及其在离散系统设计中的应用,介绍基于脉冲不变法和双线性变换法的数字滤波器设计方法,介绍数字滤波器实现的基本思路。第10章介绍模拟通信的基本原理,包括模拟调制(如AM和FM)、解调以及多路复用技术,介绍脉冲调制方法。附录A涉及矩阵代数的基本概念,附录B简要介绍MATLAB在数字信号处理中的应用,附录C编列了信号与系统学习过程中常用的数学公式。

授课内容安排的建议

全书内容涵盖了连续时间系统和离散时间系统的分析和综合、模拟滤波器、数字信号

处理、模拟通信导论等内容，主讲教师可以灵活组织和选择。课程内容组织建议仅供参考。

教 学 时 间	课 程 名 称	相 关 章 节
一学期	模拟信号与系统基础	第 1 ~ 4 章，第 6 章
一学期	系统和模拟滤波器	第 4、5*、6、7 章
一学期	数字信号处理导论	第 4*、6*、8、9 章
两学期	信号与模拟通信导论	第 1 ~ 4 章，第 5*、6、8*、10 章

* 部分内容

致 谢

感谢所有和我一起学习的学生。教育是双向的，如同学生向老师学习一样，教师也从学生那里学到了许多。本书的写作过程也是学习的过程，它花费了我数年的心血。

众多朋友为本书的出版付出了辛劳。Jack Cartinhour 博士在教材成型初期通读了全部文稿并帮助完成习题解答。George Scheets 博士在他的信号分析与通信理论课程教学中采用了本教材的早期版本。Martin Hagan 博士评阅了一章。Vijay Venkataraman 和 Wen Fung Leong 不仅审阅了部分章节，还提供了部分 MATLAB 程序和原图。Vijay 帮助完成了文稿的编排。Beau Lacefield 承担了书稿的大部分绘图工作。感谢他们。

真诚地感谢出版商 Springer 的支持。感谢 Alex Greene 对我的信任。感谢 Katie Chen、Shanty Jaganathan 及其同事们在本书编辑过程中的无私帮助。

感谢俄克拉何马州立大学电子与计算机工程学院院长 Keith Teague 博士在本书出版过程中给予的大力支持。

我用于写作的时间原本都属于我的妻子 Marceil，孩子 Tammy、Ryan、Travis 和孙子 Michael、Thomas、Matthew、Natalie、Kate，是他们的理解和支持使我得以完成书稿。

R. K. Rao Yarlagadda

于美国俄克拉何马州

目 录

译者的话

致中文版读者

前言

致谢

第1章 信号的基本概念 1

1.1 信号 1

1.1.1 信号描述 1

1.1.2 连续时间信号和离散时间信号 3

1.1.3 模拟与数字信号处理 5

1.1.4 常用信号 5

1.2 常用信号运算 8

1.2.1 时移 8

1.2.2 时域尺度变换 8

1.2.3 时域反折 9

1.2.4 幅度平移 10

1.2.5 简单对称性: 偶函数和奇函数 10

1.2.6 偶函数和奇函数的乘积 10

1.2.7 sgn 函数 (符号函数) 11

1.2.8 sinc 和 sinc^2 函数 11

1.2.9 正弦积分函数 12

1.3 信号微分与信号积分 12

1.3.1 对称信号的积分 13

1.3.2 由单位阶跃导出的信号 14

1.3.3 莱布尼茨 (Leibniz) 准则 14

1.3.4 微分与积分交换 14

1.3.5 积分与积分交换 14

1.4 奇异函数 15

1.4.1 单位冲激函数作为序列极限 17

1.4.2 阶跃函数与冲激函数 18

1.4.3 广义函数的作用 20

1.4.4 冲激函数的作用 20

1.4.5 阶跃函数的作用 21

1.5 基于积分的信号分类 22

1.5.1 信号运算的影响 23

1.5.2 周期信号 24

1.5.3 两周期信号的和 26

1.6 复信号、周期信号和对称周期信号 29

1.6.1 复数 29

1.6.2 周期复信号 32

1.6.3 周期函数的作用 32

1.6.4 对称周期信号 33

1.7 概率密度函数及其矩 35

1.8 由非周期信号产生周期信号 38

1.9 分贝 39

1.10 小结 41

习题 42

第2章 卷积和相关 46

2.1 引言 46

2.1.1 标量积和范数 46

2.2 卷积 48

2.2.1 卷积的性质 48

2.2.2 卷积的存在性 51

2.3 示例 51

2.4 卷积与矩 58

2.4.1 重复卷积与中心极限定理 60

2.4.2 反卷积 61

2.5 周期信号和非周期信号的卷积 62

2.5.1 周期信号与非周期信号的卷积 62

2.5.2 两个周期信号卷积 64

2.6 相关 65

2.6.1 互相关函数的性质 66

2.6.2 互相关与卷积 66

2.6.3 互相关函数的界 67

2.6.4 互相关的定量描述 68

2.7 能量信号的自相关函数 72

2.8 周期信号的互相关函数和自相关

函数 75

2.9 小结 78

习题 78

第3章 傅里叶级数 81

3.1 引言 81

3.2 正交基本函数 82

3.2.1 格莱姆-施密特 (Gram-Schmidt)

正交化 84

3.3 近似度评价	86
3.3.1 利用偏微分求 $c[k]$	87
3.3.2 利用完全平方和求 $c[k]$	88
3.3.3 帕斯瓦尔定理	89
3.4 傅里叶级数	91
3.4.1 指数傅里叶级数	91
3.4.2 三角傅里叶级数	95
3.4.3 指数傅里叶系数与三角傅里叶系数的关系	95
3.4.4 谐波傅里叶级数	96
3.4.5 帕斯瓦尔定理	96
3.4.6 傅里叶级数三种描述形式的特点	98
3.5 简单对称信号的傅里叶级数	98
3.5.1 傅里叶系数积分的简化	99
3.6 傅里叶级数的性质	101
3.6.1 线性	101
3.6.2 时移性	101
3.6.3 时间、频率尺度变换	101
3.6.4 时域微分	103
3.6.5 傅里叶级数的界与收敛性	106
3.6.6 时域积分	108
3.6.7 时域调制	108
3.6.8 时域相乘	109
3.6.9 频率调制	110
3.6.10 中心坐标定理	110
3.6.11 广义帕斯瓦尔定理	110
3.6.12 功率谱	111
3.7 傅里叶级数的收敛性与吉布斯现象	111
3.7.1 傅里叶定理	112
3.7.2 吉布斯 (Gibbs) 现象	112
3.7.3 谱窗平滑	116
3.8 特殊对称周期信号的傅里叶级数	117
3.8.1 半波对称信号	118
3.8.2 四分波对称信号	119
3.8.3 四分波偶对称	119
3.8.4 四分波奇对称	119
3.8.5 隐含对称性	120
3.9 半区间级数展开	120
3.10 傅里叶级数表	122
3.11 小结	123
习题	124

第4章 傅里叶变换	128
4.1 引言	128
4.2 从傅里叶级数到傅里叶变换	128
4.2.1 幅度谱和相位谱	132
4.2.2 带宽	135
4.3 傅里叶变换的性质 (1)	136
4.3.1 瑞利 (Rayleigh) 能量定理	136
4.3.2 叠加定理	137
4.3.3 时间延迟定理	137
4.3.4 尺度变换定理	138
4.3.5 对偶定理	141
4.3.6 中心坐标定理	142
4.4 傅里叶变换的性质 (2)	143
4.4.1 频移定理	144
4.4.2 调制定理	144
4.4.3 周期信号和特殊信号的傅里叶变换	145
4.4.4 时域微分定理	149
4.4.5 时域乘 t 特性 (频域微分定理)	151
4.4.6 初值定理	154
4.4.7 积分定理	154
4.5 卷积和相关	155
4.5.1 时域卷积	155
4.5.2 积分定理的证明	158
4.5.3 乘法定理 (频域卷积)	159
4.5.4 能量谱密度	162
4.6 自相关和互相关	164
4.6.1 功率谱密度	166
4.7 信号带宽	167
4.7.1 基于面积的定义	168
4.7.2 基于矩的定义	169
4.7.3 傅里叶分析的不确定性原理	170
4.8 矩与傅里叶变换	172
4.9 傅里叶变换的界	174
4.10 泊松 (Poisson's) 求和公式	175
4.11 几个有趣的例子	176
4.11.1 升余弦脉冲	177
4.12 傅里叶变换的性质和常用信号傅里叶变换表	178
4.13 小结	181
习题	181
第5章 与傅里叶变换相关的变换	187

5.1 引言	187	6.4 时不变系统与时变系统	238
5.2 余弦变换和正弦变换	187	6.5 冲激响应	240
5.3 哈特利 (Hartley) 变换	191	6.5.1 本征函数	242
5.4 拉普拉斯变换	193	6.5.2 有界输入/有界输出 (BIBO) 稳定性	243
5.4.1 收敛域 (ROC)	196	6.5.3 罗斯 (Routh-Hurwitz) 判据	244
5.4.2 双边拉普拉斯反变换	197	6.5.4 频域特征函数	247
5.4.3 有理变换式的收敛域	198	6.6 阶跃响应	249
5.5 双边拉普拉斯变换的性质	198	6.7 无失真传输	255
5.5.1 线性	198	6.7.1 群延迟和相位延迟	255
5.5.2 时移性	198	6.8 系统带宽	258
5.5.3 s 域移位	198	6.8.1 用冲激响应 $h(t)$ 或传递函数 $H(j\omega)$ 定义带宽	258
5.5.4 时域尺度变换	199	6.8.2 半功率带宽或 3dB 带宽	259
5.5.5 时域反折	199	6.8.3 等效带宽或噪声带宽	259
5.5.6 时域微分	199	6.8.4 方均根 (RMS) 带宽	260
5.5.7 时域积分	199	6.9 非线性系统	261
5.5.8 卷积	199	6.9.1 失真	262
5.6 单边拉普拉斯变换	200	6.9.2 非线性系统的输出谱	262
5.6.1 单边拉普拉斯变换的性质	201	6.9.3 非线性系统的线性化	263
5.6.2 拉普拉斯变换性质的讨论	202	6.10 理想滤波器	263
5.7 有理变换函数与拉普拉斯反变换	209	6.10.1 低通、高通、带通和带阻滤波器	265
5.7.1 有理变换函数, 极点与零点	211	6.11 因果信号傅里叶变换的实部和虚部	268
5.7.2 初值定理和终值定理的应用	212	6.11.1 希尔伯特变换描述因果信号傅里叶变换实部和虚部之间的关系	269
5.8 用拉普拉斯变换解常系数微分方程	214	6.11.2 从幅度谱 $ H(j\omega) $ 到最小相位函数 $H(s)$	270
5.8.1 拉普拉斯反变换法	215	6.12 滤波器源阻抗和负载阻抗	271
5.8.2 部分分式展开法	216	6.12.1 简单低通滤波器	272
5.9 拉普拉斯变换与其他变换的关系	220	6.12.2 简单高通滤波器	272
5.9.1 拉普拉斯变换与傅里叶变换	221	6.12.3 简单带通滤波器	274
5.9.2 哈特利变换与拉普拉斯变换	222	6.12.4 简单带阻滤波器或陷波器	278
5.10 希尔伯特变换	223	6.12.5 最大功率传输	281
5.10.1 基本概念	223	6.12.6 简单延迟线电路	281
5.10.2 无重叠谱信号的希尔伯特变换	226	6.13 小结	282
5.10.3 解析信号	227	习题	282
5.11 小结	228	第7章 滤波器	287
习题	228	7.1 引言	287
第6章 系统与电路	233	7.2 伯德 (Bode) 图	290
6.1 引言	233	7.2.1 增益余量和相位余量	299
6.2 线性系统	233		
6.3 理想二端元件与基尔霍夫 (Kirchhoff) 定律	234		
6.3.1 二端元件方程	234		
6.3.2 基尔霍夫定律	236		

7.3 模拟滤波器	300	8.2 信号采样	368
7.3.1 基于幅频特性的设计方法	300	8.2.1 理想采样	368
7.3.2 巴特沃思 (Butterworth) 滤波器	302	8.2.2 均匀低通采样 (奈奎斯特低通 采样定理)	370
7.3.3 契比雪夫 (Chebyshev) 滤波器	304	8.2.3 插值公式和广义傅里叶级数	374
7.4 基于相频特性的设计方法	311	8.2.4 采样率低于奈奎斯特速率带来 的问题	377
7.4.1 最大平坦型延迟逼近	313	8.2.5 平顶采样	380
7.4.2 贝塞尔 (Bessel) 函数的群 延迟	314	8.2.6 均匀带通采样定理	382
7.5 频率变换	316	8.2.7 离散时间系统与连续时间系统 等效	383
7.5.1 归一化低通到高通变换	316	8.3 常用离散信号	384
7.5.2 归一化低通到带通变换	317	8.3.1 离散信号运算	386
7.5.3 归一化低通到带阻变换	318	8.3.2 离散信号的卷积和相关	387
7.5.4 从低通、高通、带通、带阻滤 波器到归一化低通滤波器的参 数变换	321	8.3.3 有限长序列、右边序列、左边 序列、双边序列和因果序列	389
7.6 多端元件	325	8.3.4 离散能量信号和离散功率 信号	389
7.6.1 二端口参数	325	8.4 离散时间傅里叶级数 (DTFS)	391
7.6.2 含有多端元件的电路分析	331	8.4.1 两个等周期序列的周期性 卷积	393
7.6.3 受控源	332	8.4.2 帕斯瓦尔恒等式	394
7.7 有源滤波器	332	8.5 离散时间傅里叶变换 (DTFT)	394
7.7.1 运算放大器	332	8.5.1 离散时间傅里叶变换	394
7.7.2 反相放大器	333	8.5.2 对称实信号的离散时间傅里叶 变换	395
7.7.3 同相放大器	335	8.6 离散时间傅里叶变换的性质	399
7.7.4 简单二阶低通滤波器和全通 网络	338	8.6.1 周期性	400
7.8 增益调整	340	8.6.2 线性	402
7.9 缩放	342	8.6.3 时移 (延迟)	402
7.9.1 RLC 电路的幅度缩放	342	8.6.4 频移 (调制)	402
7.9.2 RLC 电路的频率缩放	343	8.6.5 时域尺度变换	403
7.9.3 有源滤波器的幅度缩放和频率 缩放	343	8.6.6 频域微分	403
7.9.4 延迟缩放	345	8.6.7 差分	404
7.10 RC-CR 变换: 低通滤波器到高通 滤波器	347	8.6.8 累积和	405
7.11 带通、带阻和二阶滤波器	349	8.6.9 卷积定理	405
7.12 灵敏度	354	8.6.10 时域相乘	407
7.13 小结	357	8.6.11 帕斯瓦尔恒等式	407
习题	357	8.6.12 中心坐标 (初值) 定理	408
第8章 离散时间信号及其傅里叶 变换	367	8.6.13 简单数字加密	408
8.1 引言	367	8.7 离散时间傅里叶变换的性质及其 变换表	408
		8.8 从连续时间傅里叶变换的采样到	

离散时间傅里叶变换	410	9.5.5 乘 n	451
8.9 离散傅里叶变换 (DFT)	412	9.5.6 差分与求和	451
8.9.1 离散傅里叶变换和离散傅里叶 反变换的矩阵表示	413	9.5.7 卷积定理	452
8.9.2 直接计算离散傅里叶变换的运 算量	415	9.5.8 相关定理	453
8.10 离散傅里叶变换的性质	416	9.5.9 初值定理	454
8.10.1 实序列的离散傅里叶变换和反 变换	416	9.5.10 终值定理	454
8.10.2 线性	417	9.6 z 变换的性质和 z 变换表	455
8.10.3 对称性	417	9.7 反 z 变换	457
8.10.4 时移特性	418	9.7.1 直接法	457
8.10.5 频移特性	418	9.7.2 部分分式展开法 (查表法)	458
8.10.6 偶序列	419	9.7.3 幂级数展开法	462
8.10.7 奇序列	419	9.8 单边 z 变换	464
8.10.8 离散时域卷积定理	420	9.8.1 时移特性	464
8.10.9 离散频域卷积定理	421	9.9 离散系统	466
8.10.10 离散时域相关定理	421	9.9.1 离散传递函数	468
8.10.11 帕斯瓦尔定理	422	9.9.2 舒尔-科恩 (Schur-Cohn) 稳定性 判据	470
8.10.12 补零	422	9.9.3 双线性变换	471
8.10.13 插值	423	9.10 离散系统设计准则	473
8.10.14 抽取	424	9.10.1 时域准则——冲激响应不 变法	474
8.11 小结	425	9.10.2 频域准则——双线性变 换法	477
习题	425	9.11 有限冲激响应 (FIR) 滤波器 设计	481
第9章 离散系统	430	9.11.1 低通 FIR 滤波器	482
9.1 引言	430	9.11.2 高通、带通和带阻 FIR 滤 波器	484
9.2 计算离散傅里叶变换	431	9.11.3 加窗	487
9.2.1 离散系统的信号流图	431	9.12 数字滤波器的实现	493
9.2.2 快速傅里叶变换 (FFT)	432	9.12.1 级联实现	494
9.3 离散傅里叶变换的应用	436	9.12.2 并联实现	495
9.3.1 信号的隐含周期性	436	9.12.3 全通滤波器的实现	495
9.3.2 有限长序列卷积	437	9.12.4 数字滤波器换位结构	496
9.3.3 离散信号相关	441	9.12.5 FIR 滤波器的实现	496
9.3.4 离散解卷积	442	9.13 小结	497
9.4 z 变换	444	习题	498
9.4.1 收敛域 (ROC)	445	第10章 模拟调制	502
9.4.2 z 变换与离散时间傅里叶变换 (DTFT)	448	10.1 引言	502
9.5 z 变换的性质	449	10.2 限幅器和混频器	503
9.5.1 线性	449	10.2.1 限幅器	503
9.5.2 时移	450	10.2.2 混频器	504
9.5.3 时间反折	450	10.3 线性调制	505
9.5.4 乘指数	450		

10.3.1 双边带 (DSB) 调制	505	广播	550
10.3.2 双边带信号解调	506	10.16 脉冲调制	551
10.4 倍频器和分频器	508	10.16.1 脉冲幅度调制 (PAM)	552
10.5 幅度调制 (AM)	510	10.16.2 脉冲调制的问题	553
10.5.1 调制度	511	10.16.3 时分复用 (TDM)	554
10.5.2 带宽要求	512	10.17 脉冲编码调制 (PCM)	556
10.5.3 调幅信号的功率与调制效率	512	10.17.1 量化	556
10.5.4 调幅信号的平均功率	514	10.17.2 编码	558
10.6 调幅信号的产生	514	10.17.3 信道带宽与量化信噪比	559
10.6.1 平方律调制器	514	10.17.4 数字载波调制	560
10.6.2 开关调制器	515	10.18 小结	562
10.6.3 平衡调制器	516	习题	562
10.7 调幅信号的解调	516	附录	566
10.7.1 整流检波器	516	附录 A 矩阵代数	566
10.7.2 相干检波器或同步检波器	517	A.1 矩阵的描述	566
10.7.3 平方检波器	518	A.2 矩阵代数基础	566
10.7.4 包络检波器	518	A.2.1 向量范数	568
10.8 不对称边带信号	520	A.3 矩阵方程的解	569
10.8.1 单边带 (SSB) 信号	520	A.3.1 行列式	570
10.8.2 残留边带 (VSB) 信号	521	A.3.2 克莱姆 (Cramer's) 准则	571
10.8.3 单边带信号和残留边带信号 的解调	523	A.3.3 矩阵的秩	572
10.8.4 单边带信号的非相干解调	523	A.4 矩阵的逆及其在解方程组中的 应用	573
10.8.5 移相调制器和解调器	524	A.5 特征根与特征向量	574
10.9 频率变换和混频	525	A.6 奇异值分解 (SVD)	580
10.10 超外差调幅 (AM) 接收机	528	A.7 矩阵的广义逆	582
10.11 角度调制	530	A.8 超定方程和欠定方程	583
10.11.1 窄带 (NB) 角度调制	533	A.8.1 超定方程的最小二乘解 ($m > n$)	583
10.11.2 角度调制信号的产生	534	A.8.2 欠定方程的最小二乘解 ($m \leq n$)	586
10.12 角度调制信号的谱	535	A.9 数值插值: 多项式插值和拉格 朗日插值	588
10.12.1 贝塞尔函数的性质	536	A.9.1 多项式近似	588
10.12.2 角度调制信号的功率	539	A.9.2 拉格朗日插值公式	589
10.13 角度调制信号的解调	541	习题	590
10.13.1 鉴频器	541	附录 B MATLAB 在数字信号处理中的 应用	592
10.13.2 延迟线微分器	544	B.1 引言	592
10.14 调频 (FM) 接收机	544	B.2 信号的描述	593
10.14.1 失真	544	B.3 信号积分	595
10.14.2 预加重与去加重	545	B.4 快速傅里叶变换 (FFT)	596
10.14.3 多径效应	546	B.5 信号卷积	598
10.15 频分复用 (FDM)	548		
10.15.1 正交幅度调制 (QAM) 或正交 多路复用 (QM)	549		
10.15.2 调频立体声复用和调频 (FM)			

B. 6 数值差分	600	B. 12 例 9.11.3 的 MATLAB 代码	608
B. 7 傅里叶级数	601	附录 C 常用数学公式	610
B. 8 多项式的根, 部分分式展开, 函数 零极点	603	C. 1 三角恒等式	610
B. 8.1 部分分式展开	603	C. 2 对数、指数、复数	611
B. 9 伯德图, 冲激响应与阶跃响应	604	C. 3 导数	611
B. 9.1 伯德图	604	C. 4 不定积分	612
B. 9.2 冲激响应与阶跃响应	605	C. 5 定积分	614
B. 10 数字滤波器的频率响应	606	C. 6 求和公式	614
B. 11 构建简单的 MATLAB 调用 函数	608	C. 7 级数	615
		C. 8 特殊常数	615
		参考文献	616