

理 工 类 专 业  
研 究 生 教 学 用 书

# 信号与系统分析

*Signals and Systems Analysis*

张德民 胡 庆 编著

高等教育出版社

理 工 类 专 业  
研 究 生 教 学 用 书

# 信号与系统分析

Signals and Systems Analysis

张德民 胡 庆 编著

高等教育出版社

### 图书在版编目 (CIP) 数据

信号与系统分析/张德民, 胡庆编著. —北京: 高等教育出版社, 2006. 9

ISBN 7-04-020145-3

I. 信... II. ①张... ②胡... III. ①信号分析—研究生—教材②信号系统—系统分析—研究生—教材

IV. TN911.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 111020 号

策划编辑 陈红英 责任编辑 陈红英  
封面设计 李卫青 责任印制 毛斯璐

---

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-58581118
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	免费咨询	800-810-0598
邮政编码	100011	网 址	<a href="http://www.hep.edu.cn">http://www.hep.edu.cn</a>
总 机	010-58581000		<a href="http://www.hep.com.cn">http://www.hep.com.cn</a>
经 销	蓝色畅想图书发行有限公司	网上订购	<a href="http://www.landrace.com">http://www.landrace.com</a>
印 刷	北京宏伟双华印刷有限公司		<a href="http://www.landrace.com.cn">http://www.landrace.com.cn</a>
		畅想教育	<a href="http://www.widedu.com">http://www.widedu.com</a>
开 本	787×960 1/16	版 次	2006 年 9 月第 1 版
印 张	14.75	印 次	2006 年 9 月第 1 次印刷
字 数	250 000	定 价	21.00 元

---

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 20145-00

## 内 容 提 要

本书在“信号与线性系统”课程的基础上,用相对较高的数学思路 and 手段,系统地研讨了信号与系统分析的基本理论和方法,旨在为电子、控制、信息类学科工学、工程硕士研究生建立信号与系统分析的基础平台。全书分为五章,第一章作为与本科相关内容的衔接和全书的基础,强化学生对信号和系统分析物理概念和数学方法的融合理解;第二章学习离散信号双重性和变换统一性,深刻地理解信号时域和频域描述的本质联系,由信号双重性和变换统一性扩充了信号分析的方法;第三章在变换统一性基础上系统地研讨了傅氏分析原理和方法;第四章以矩展开原理为工具,讨论系统分析的基本理论和基本方法,重点结合在信息系统中的重要功能模块实例的实现方法研讨基本系统的实现和特性分析;第五章学习模拟信号与系统数字处理及逼近的基本原理和重要特性,进而掌握模拟系统的数字逼近和设计方法。

本书努力做到深入浅出,论述清楚,注重物理概念、基本理论和基本分析方法的融合。书中精选了一定量的例题,各章后附有习题。

本书适合电子信息类专业硕士研究生课程、工程硕士学位课程或选修课教材或参考书,也适合于相关教师和科技工程人员参考。

## 郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其为人将承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人给予严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

**反盗版举报电话：**(010) 58581897/58581896/58581879

**传 真：**(010) 82086060

**E - mail：**dd@hep.com.cn

**通信地址：**北京市西城区德外大街4号

高等教育出版社打击盗版办公室

**邮 编：**100011

购书请拨打电话：(010)58581118

# 前 言

21 世纪,世界已进入信息时代,电子信息技术已经渗透到了众多学科、行业和领域。在此背景下,一个工科工程师要能够胜任其工作,除了本专业方面的训练外,还需要掌握电子信息技术,必须具有良好的信号和系统分析的基本素养和训练。信号与系统分析是电子信息技术的重要理论和工程基础,其重要基础地位更为显现。

目前,随着我国本科教育规模迅速扩大,硕士研究生的招生规模也在扩张。为了适应当今社会、技术发展的需要,众多学科专业的研究生均需具有信号和系统分析的基础。本书编写的初衷就是为广大的工科硕士研究生提供一本工程适用的、在研究生知识基础上建立信号与系统分析基础的教材和参考书。

本书在相对较高的理论基础上研究信号和系统,从理论上更深入地介绍信号及系统分析的基本原理和概念,使读者对信号及系统的基本原理和概念有相对更本质、更系统、更深入的理解,为工科,特别是电子类专业研究生建立介于本科生和信号与信息处理学科研究生之间的关于信号与系统分析的基础平台。

本书在内容上保证足够的理论水平情况下,注重物理、系统概念和方法的阐述;注重讨论研究信号的四种变换(傅氏变换、傅氏级数、傅氏 Z 变换和离散傅氏级数)的统一性,使读者对变换有更深刻和本质的理解;注重讨论研究离散信号的双重性,为离散信号和系统处理提供更多的研究处理方法;结合通信与电子信息系统的重要功能模块讨论,具有较强的实用性。

在讨论中,结合电子信息系统的一些主要信号和功能的基本系统的分析和研讨展开,努力做到深入浅出,论述清楚;注重物理概念、基本理论和基本分析方法的融合。书中精选了一定量的例题,各章后附有习题,使读者通过练习,能更自然和牢固地掌握信号和系统分析的基本思路和方法。本书可为读者在信息处理、信息系统研究、控制与检测和自动化等学科领域的后续课程的学习及研究奠定良好的基础。

学习本书所需的主要先修知识有本科的信号与系统、数字信号处理等

相关内容。本书的参考学时为 50 学时,前三章主要学习相关基本原理和方法,后两章侧重学习实现算法及应用技术,两部分的教学学时内容建议根据学生的知识背景等具体情况进行合理分配和调整。

在本书的撰写过程中,与许多同事和学生作过长时间的有益的研讨,为本书的形成起到了建设性的作用。高等教育出版社研究生教育与学术著作分社领导和编辑为本书的撰写和出版给予了支持和帮助,在此表示衷心谢忱!

编著者

2006 年 7 月于重庆

# 目 录

<b>第一章 信号、系统及变换回顾</b> .....	(1)
1.1 离散信号及系统回顾 .....	(1)
1.1.1 几种常见的序列 .....	(1)
1.1.2 序列的常规运算 .....	(3)
1.1.3 离散系统 .....	(5)
1.2 连续信号及系统回顾 .....	(11)
1.2.1 连续信号 .....	(11)
1.2.2 连续系统 .....	(12)
1.3 Z变换回顾 .....	(16)
1.3.1 Z变换 .....	(16)
1.3.2 Z反变换 .....	(21)
1.3.3 Z变换的基本性质 .....	(25)
1.3.4 系统函数 .....	(29)
1.4 离散系统分析 .....	(30)
1.4.1 离散系统的描述 .....	(30)
1.4.2 离散系统的求解 .....	(31)
1.4.3 离散系统的实现 .....	(32)
1.4.4 离散系统频率特性分析 .....	(35)
1.4.5 两个典型系统 .....	(39)
1.5 模拟系统的数字仿真 .....	(44)
1.5.1 仿真定理 .....	(44)
1.5.2 脉冲响应不变法设计原理 .....	(45)
1.5.3 脉冲响应不变法设计方法 .....	(46)
习题一 .....	(48)
<b>第二章 离散信号的双重性和变换的统一性</b> .....	(55)
2.1 信号变换的统一性 .....	(55)
2.1.1 信号的分类及对应的变换 .....	(56)
2.1.2 信号时域和频域关系的规律和物理意义 .....	(57)
2.1.3 各类信号的变换 .....	(58)



2.2 离散信号的双重性原理 .....	(63)
2.2.1 双重性原理 .....	(64)
2.2.2 变换的四重性原理 .....	(64)
2.2.3 关于离散信号的识别 .....	(65)
2.3 离散信号双重性原理的应用 .....	(67)
2.3.1 交叉卷积及交叉循环卷积 .....	(67)
2.3.2 利用双重性原理计算正反变换 .....	(71)
2.3.3 双重性原理的其他应用 .....	(71)
习题二 .....	(73)
<b>第三章 傅里叶分析</b> .....	<b>(75)</b>
3.1 傅里叶变换 .....	(75)
3.1.1 傅氏变换的定义和存在性 .....	(75)
3.1.2 $X(\omega)$ 的物理意义及实信号的傅氏变换 .....	(76)
3.1.3 傅氏变换的基本性质 .....	(79)
3.2 傅氏级数和线谱 .....	(85)
3.2.1 傅氏级数的傅氏变换描述 .....	(85)
3.2.2 傅氏级数的存在性及物理意义 .....	(86)
3.2.3 傅氏级数的重要性质 .....	(88)
3.3 离散傅氏级数的数学解释 .....	(91)
3.3.1 泊松求和公式 .....	(91)
3.3.2 傅氏变换样本与傅氏级数 .....	(93)
3.3.3 傅氏级数与离散傅氏级数 .....	(94)
3.3.4 数值计算的基本定理 .....	(96)
3.4 离散傅氏变换 .....	(97)
3.4.1 DFT 引入背景和定义 .....	(97)
3.4.2 DFT 的基本性质 .....	(100)
3.5 频域取样 .....	(106)
3.5.1 频域取样定理 .....	(106)
3.5.2 内插公式及内插函数 .....	(107)
3.6 快速傅氏变换 .....	(108)
3.6.1 FFT 的引出和基本思想 .....	(108)
3.6.2 时域抽取基 2 FFT .....	(109)
3.6.3 频域抽取基 2 FFT .....	(114)
3.6.4 FFT 运算实现的说明 .....	(117)

3.7 FFT 的应用 .....	(118)
3.7.1 实序列的 FFT 算法 .....	(118)
3.7.2 利用 DFT 计算傅氏变换 .....	(120)
3.7.3 利用 DFT 计算傅氏级数 .....	(122)
3.7.4 利用 DFT 实现一些数学计算 .....	(123)
习题三 .....	(125)
<b>第四章 系统分析与逼近 .....</b>	<b>(132)</b>
4.1 矩展开理论及其应用 .....	(132)
4.1.1 矩展开 .....	(132)
4.1.2 矩展开的电路意义 .....	(133)
4.1.3 矩展开的截断误差 .....	(134)
4.1.4 中心矩展开 .....	(135)
4.1.5 实信号谱 $H(\omega)$ 与 $m_0$ 、 $\eta$ 和 $\mu_2$ 的关系 .....	(136)
4.1.6 矩展开的一些应用 .....	(137)
4.2 滤波器模型 .....	(151)
4.2.1 滤波器傅氏级数解法 .....	(151)
4.2.2 因果滤波器的实现 .....	(152)
4.2.3 希尔伯特变换 .....	(154)
4.2.4 带通滤波器 .....	(157)
4.3 有限阶系统分析和逼近 .....	(161)
4.3.1 拉氏变换及系统函数 .....	(161)
4.3.2 有限阶系统 .....	(162)
4.3.3 全通系统和最小相位系统 .....	(165)
4.3.4 线性系统的最大响应 .....	(166)
习题四 .....	(167)
<b>第五章 模拟信号及系统的数字处理 .....</b>	<b>(170)</b>
5.1 带限近似 .....	(170)
5.1.1 取样和内插 .....	(170)
5.1.2 带限近似 .....	(174)
5.2 均方逼近 .....	(178)
5.2.1 数学概念和原理 .....	(178)
5.2.2 三角函数逼近 .....	(180)
5.2.3 频域逼近 .....	(181)
5.2.4 指数函数逼近 .....	(183)

5.2.5 离散信号 .....	(186)
5.3 系统的数字逼近仿真 .....	(189)
5.3.1 数字仿真的一般方法 .....	(189)
5.3.2 数字仿真系统逼近设计原理 .....	(191)
5.3.3 切比雪夫逼近设计法 .....	(193)
5.3.4 最小均方误差逼近设计法 .....	(198)
5.3.5 插值逼近设计法 .....	(211)
习题五 .....	(220)
主要参考文献 .....	(222)

# Contents

<b>Chapter 1 The Review of Signals, Systems and Transforms</b> .....	(1)
1.1 The Review of Discrete-Time Signals and Systems .....	(1)
1.1.1 Several Familiar Sequences .....	(1)
1.1.2 The General Computation of Sequence .....	(3)
1.1.3 Discrete-Time System .....	(5)
1.2 The Review of Continuous-Time Signals and Systems .....	(11)
1.2.1 Continuous-Time Signals .....	(11)
1.2.2 Continuous-Time Systems .....	(12)
1.3 The Review of The Z-Transforms .....	(16)
1.3.1 The Z-Transform .....	(16)
1.3.2 The Inverse Z-Transform .....	(21)
1.3.3 Basic Properties of the Z-Transform .....	(25)
1.3.4 Function of Systems .....	(29)
1.4 Analysis of Discrete-Time System .....	(30)
1.4.1 Representation of Discrete-Time Systems .....	(30)
1.4.2 Response of Discrete-Time Systems .....	(31)
1.4.3 Implementation of Discrete-Time Systems .....	(32)
1.4.4 Spectral Analysis of Discrete-Time Systems .....	(35)
1.4.5 Two Typical Systems .....	(39)
1.5 Digital Simulations of Analog Systems .....	(44)
1.5.1 Simulation Theorem .....	(44)
1.5.2 The Design Principle of Impulse Response Invariant Method .....	(45)
1.5.3 The Design Method of Impulse Response Invariant Method .....	(46)
Exercises 1 .....	(48)
<b>Chapter 2 The Dualism of Discrete-Time Signals and The         Unity of Transforms</b> .....	(55)
2.1 The Unity of Signal Transforms .....	(55)

2. 1. 1	Classification and Transform of Signals .....	(56)
2. 1. 2	The Physical Meaning and Time-Frequency Rules of Signals .....	(57)
2. 1. 3	Transforms of Signals .....	(58)
2. 2	The Multiattribute Principle of Discrete-Time Signals .....	(63)
2. 2. 1	The Dualism Principle .....	(64)
2. 2. 2	The Quadruplicate Principle of Transforms .....	(64)
2. 2. 3	The Identification of Discrete-Time Signals .....	(65)
2. 3	The Application of Dualism Principle of Discrete-Time Signals .....	(67)
2. 3. 1	Across Convolution and Across Circular Convolution .....	(67)
2. 3. 2	Computation of the Transform and Inverse Transform by Dualism Principle .....	(71)
2. 3. 3	Other Applications of Dualism Principle .....	(71)
	Exercises 2 .....	(73)
<b>Chapter 3</b>	<b>Fourier Analysis</b> .....	<b>(75)</b>
3. 1	Fourier Transforms .....	(75)
3. 1. 1	The Definition and Existence of Fourier Transforms .....	(75)
3. 1. 2	The Physical Meaning of $X(\omega)$ and The Fourier Transform of Real Signal .....	(76)
3. 1. 3	The Basal Properties of Fourier Transforms .....	(79)
3. 2	Fourier Series and Discrete Spectrum .....	(85)
3. 2. 1	Fourier Transforms Representation of Fourier Series .....	(85)
3. 2. 2	The Existence and Physical Meaning of Fourier Series .....	(86)
3. 2. 3	The Important Properties of Fourier Series .....	(88)
3. 3	The Mathematical Explanation of DFS .....	(91)
3. 3. 1	The Poisson Sum Formula .....	(91)
3. 3. 2	Fourier Series and The Sampling of Fourier Transform .....	(93)
3. 3. 3	Fourier Series and DFS .....	(94)
3. 3. 4	The Basal Theorem of Numerical Computation .....	(96)
3. 4	The Discrete Fourier Transform .....	(97)
3. 4. 1	The Inductive Background and Definition of DFT .....	(97)
3. 4. 2	The Basal Properties of DFT .....	(100)
3. 5	Frequency Sampling .....	(106)

3.5.1	Frequency Sampling Theorem .....	(106)
3.5.2	Interpolation Function and Interpolation Formula .....	(107)
3.6	Fast Fourier Transform .....	(108)
3.6.1	The Introduction and Basal Thought of FFT .....	(108)
3.6.2	The Time-Domain Decimation Algorithm of The Radix-2 FFT .....	(109)
3.6.3	The Frequency-Domain Decimation Algorithm of The Radix-2 FFT .....	(114)
3.6.4	Illumination of The Implementation of FFT Computation ...	(117)
3.7	Applications of FFT .....	(118)
3.7.1	FFT Algorithm of Real Sequences .....	(118)
3.7.2	Evaluation of Fourier Transform by DFT .....	(120)
3.7.3	Evaluation of Fourier Series by DFT .....	(122)
3.7.4	The Implementation of Mathematical Computations by DFT .....	(123)
Exercises 3 .....		(125)
<b>Chapter 4</b>	<b>Analysis and Approach of Systems</b> .....	(132)
4.1	Moment Expansion Theory and Applications .....	(132)
4.1.1	Moment Expansion .....	(132)
4.1.2	The Circuit Meaning of Moment Expansion .....	(133)
4.1.3	The Truncation Error of Moment Expansion .....	(134)
4.1.4	Central Moment Expansion .....	(135)
4.1.5	The Relation Between Real Signal's $H(\omega)$ and $m_0, \eta, \mu_2$ .....	(136)
4.1.6	Some Applications of Moment Expansion .....	(137)
4.2	Filter Models .....	(151)
4.2.1	The Fourier Series Solution of Filter .....	(151)
4.2.2	The Implementation of Causal Filter .....	(152)
4.2.3	Hilbert Transform .....	(154)
4.2.4	Bandpass Filters .....	(157)
4.3	Analysis and Approach of Finite-Order Systems .....	(161)
4.3.1	Laplace Transform And System Function .....	(161)
4.3.2	Finite-Order Systems .....	(162)
4.3.3	All-Pass System and Minimum-Phase System .....	(165)

4.3.4	Maximum Response of Linear Systems .....	(166)
Exercises 4	.....	(167)
<b>Chapter 5</b>	<b>The Digital Processing of Analog Signals and</b>	
	<b>Systems</b> .....	(170)
5.1	Bandlimited Approximations .....	(170)
5.1.1	Sampling and Interpolation .....	(170)
5.1.2	Bandlimited Approximations .....	(174)
5.2	Mean-Square Approximations .....	(178)
5.2.1	Mathematical Concepts and Principles .....	(178)
5.2.2	Trigonometric Function Approximation .....	(180)
5.2.3	Frequency Approximation .....	(181)
5.2.4	The Exponential Function Approximation .....	(183)
5.2.5	Discrete Signals .....	(186)
5.3	Digital Simulation of Analog Systems .....	(189)
5.3.1	The Common Method of Digital Simulation .....	(189)
5.3.2	The Approximation Design Principle of Digital Simulation Systems .....	(191)
5.3.3	The Design Method of Tchebycheff Approximation .....	(193)
5.3.4	The Design Method of Minimum Mean Square Error Approximation .....	(198)
5.3.5	The Design Method of Interpolation Approximation .....	(211)
Exercises 5	.....	(220)
<b>Bibliography</b>	.....	(222)

# 第一章 信号、系统及变换回顾

本章内容主要与本科相应课程内容衔接,起承上启下的作用,一方面对本科阶段已学习的主要相关知识点进行复习,另一方面在讨论中更强调物理概念和数学方法及其结合,使读者更深刻地理解信号和系统的本质的、物理的联系及数学解释。从更高层次、系统地理解相应的基本原理和概念,为后续的学习、讨论和分析打下坚实基础。

## 1.1 离散信号及系统回顾

### 1.1.1 几种常见的序列

若  $x(n)$  是仅在对所有整数变量  $n$  有意义的数列,称为序列,  $x(n)$  也称为离散信号。  $x(n)$  仅在变量  $n$  为整数时有定义,在其他地方视为无定义,而非取值为 0。其中,变量  $n$  在大多数应用中理解为离散的时间标量,此时也称为时间离散信号。在本书中若无特殊说明,其变量  $n$  均指时间离散变量。下面给出几种常用序列的定义。

#### 1. 单位脉冲序列( $\delta$ 序列)

$\delta$ 序列在  $n$  为非 0 值时,恒为 0;而仅在  $n$  为 0 时,脉冲强度为 1。其定义为

$$\delta(n) = \begin{cases} 1 & n = 0 \\ 0 & n \neq 0 \end{cases} \quad (1.1)$$



任意序列  $x(n)$  均可由  $\delta(n)$  表示, 即

$$x(n) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(k)\delta(n-k) \quad (1.2)$$

式中,  $x(k)$  为不同延时的单位脉冲序列  $\delta(n-k)$  的权值, 表示延时脉冲强度的大小。用式(1.2)来描述任意序列, 可以给序列的运算和算法的推导带来方便。

## 2. 单位阶跃序列

单位阶跃序列在变量  $n$  大于等于 0 时, 恒为 1; 当  $n$  小于 0 时, 脉冲强度为 0。其定义为

$$u(n) = \begin{cases} 1 & n \geq 0 \\ 0 & n < 0 \end{cases} \quad (1.3)$$

阶跃序列常用来定义任意序列的描述范围(定义域), 用阶跃序列  $u(n)$  或适当延时的阶跃序列  $u(n-k)$  去乘以某序列  $x(n)$ , 所得到的新序列的值域由  $x(n)$  确定, 但其关于  $n$  的定义域由  $u(n)$  或  $u(n-k)$  确定。

**例 1-1** 一信号定义为

$$x(n) = \begin{cases} x_1(n) & n_1 \leq n < n_2 \\ x_2(n) & n_2 \leq n < n_3 \\ x_3(n) & n \geq n_3 \end{cases}$$

试用阶跃序列描述  $x(n)$ 。

**解** 由阶跃序列的定义, 序列  $x(n)$  可以重写成

$$x(n) = x_1(n)[u(n-n_1) - u(n-n_2)] + x_2(n)[u(n-n_2) - u(n-n_3)] + x_3(n)u(n-n_3)$$

采用此等效描述, 可以比较容易地对序列进行运算。

## 3. 矩形序列(窗口序列)

矩形序列定义为

$$R_N(n) = \begin{cases} 1 & 0 \leq n \leq N-1 \\ 0 & n < 0, n \geq N \end{cases} \quad (1.4)$$

矩形序列为  $N$  点序列, 其定义域为  $0 \leq n \leq N-1$ 。通常用矩形序列或它的适当延时去截取信号序列  $x(n)$  的一段( $N$  点), 就像窗户一样, 当窗户打开后就可以通过窗口看见外面的事物, 所以又称为窗口序列或窗取序列。窗口序列在数字信号处理中有普遍的应用。

容易看出,  $\delta(n)$ 、 $u(n)$  和  $R_N(n)$  三个序列间有如下关系: