



MATLAB应用技术

MATLAB

SEVENTH

MATLAB 7

MATLAB APPLICATION

辅助信号处理技术与应用

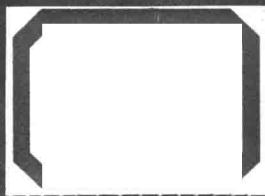
飞思科技产品研发中心 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

畅销书升级



MATLAB应用技术

MATLAB

SEVENTH

MATLAB 7

MATLAB APPLICATION

辅助信号处理技术与应用

飞思科技产品研发中心

编著

藏书

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书是“MATLAB 应用技术”系列丛书之一,介绍了信号与系统基础知识、常用信号变换、离散系统结构、IIR 数字滤波器设计、FIR 数字滤波器设计、平稳信号分析、非平稳信号分析、高斯信号分析以及信号处理的 GUI 实现。其中,信号与系统基础知识包括连续信号与模型、离散信号与模型;常用信号变换包括 Z 变换、Chirp Z 变换、FFT 变换、DCT 变换和 Hilbert 变换等;离散系统结构包括 IIR、FIR 和 Lattice 结构;IIR 滤波器设计包括模拟和数字低通、高通、带通与带阻滤波器设计,以及基于冲激响应不变法和双线性 Z 变换法的 IIR 滤波器设计等;FIR 滤波器设计包括基于窗函数、频率抽样法和切比雪夫逼近法的 FIR 滤波器设计;平稳信号分析包括经典功率谱估计、基于参数模型的功率谱估计和基于非参数模型的功率谱估计;非平稳信号分析包括 STFT 变换、Gabor 展开、Wigner-Ville 分布与 Choi-Williams 分布;非高斯信号分析包括基于非参数法的双谱估计、基于参数模型的双谱估计,以及双谱估计的应用;信号处理的 GUI 实现包括滤波器设计与分析的 FDATool 工具和滤波器设计与信号分析的 SPTool 工具。

本书可作为理工科各专业的高年级本科生、研究生学习信号处理的辅助教材,也可作为希望在这一领域进行研究和应用的科技工作者的参考书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

MATLAB 7 辅助信号处理技术与应用 / 飞思科技产品研发中心编著. —北京: 电子工业出版社, 2005.3
(MATLAB 应用技术)

ISBN 7-121-00936-6

I. M... II. 飞... III. 信号处理—计算机辅助计算—软件包, MATLAB IV. TN911.7-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 010433 号

责任编辑: 王 蒙

印 刷: 北京智力达印刷有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京海淀区万寿路 173 信箱 邮编: 100036

经 销: 各地新华书店

开 本: 787×1092 1/16 印张: 29 字数: 788.8 千字

印 次: 2005 年 3 月第 1 次印刷

印 数: 5 000 册 定价: 39.00 元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系电话: 010-68279077。质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

出版说明

MATLAB 是当今最优秀的科技应用软件之一，它以强大的科学计算与可视化功能、简单易用、开放式可扩展环境，特别是所附带的三十多种面向不同领域的工具箱支持，使得它在许多科学领域中成为计算机辅助设计和分析、算法研究和应用开发的基本工具和首选平台。

MATLAB 具有其他高级语言难以比拟的一些优点，编写简单，编程效率高，易学易懂，因此 MATLAB 语言也被通俗地称为演算纸式的科学算法语言。在控制、通信、信号处理以及科学计算等领域中，MATLAB 都被广泛的应用，已经被认可为能够有效提高工作效率，改善设计手段的工具软件，掌握了 MATLAB 就好比掌握了开启这些专业领域大门的钥匙。

这套丛书的推出，将在 MATLAB 新版本软件和使用之间架起一座桥梁，让国内的工程技术人员无需花费太多的时间和精力，就能尽快掌握该软件以及它的一些新特性和新功能，并通过大量的实例告诉使用者如何解决面临的实际问题。

本套丛书首批将推出 5 种图书，简介如下：

MATLAB 7 基础与提高
全面系统地介绍了 MATLAB 7 这个功能强大的软件。首先详细讲解了 MATLAB 数值运算、符号运算、程序设计和基本绘图功能；然后举出了很多应用实例，旨在通过实践操作巩固学习前面所介绍的知识；最后讲述了 MATLAB 的高级部分，包括 GUI 界面设计、Simulink、Notbook 几种常用的工具箱以及外部程序接口知识等。
小波分析理论与 MATLAB 7 实现
以最新推出的小波分析工具箱 Wavelet Toolbox 3.0 版为基础。全书共分为三篇，第一篇着重介绍了小波理论基础，包括小波基础知识、连续小波变换、离散小波变换、多分辨率分析与正交小波变换、小波变换和多采样滤波器组、二维小波变换与图像处理以及小波包的基本原理等；第二篇重点说明了小波分析工具箱的详细使用方法，包括图形用户接口、小波通用函数、一维小波分析的 MATLAB 实现、二维小波分析的 MATLAB 实现、小波包变换的 MATLAB 实现、信号和图像的降噪和压缩、以及最新的信号和图像的提升小波变换等内容；第三篇主要介绍小波工具箱在语音和生物信号处理、故障诊断以及在数字水印中的应用方法。
MATLAB 7 辅助控制系统设计与仿真
通过介绍 MATLAB 7 软件及其控制系统工具箱的使用方法，并结合控制系统的设计流程以及实际应用，全面系统地介绍了控制系统设计与仿真的全过程。全书内容由浅入深，以工程应用为背景，从基础知识、建模与分析、设计与仿真流程三个方面对控制系统的设计与仿真进行了深入的说明，同时书中列举大量实例，尽量贴近工程实际，具有很强的代表性。
MATLAB 7 辅助信号处理技术与应用
系统地介绍了信号与系统基础知识，常用信号变换、离散系统结构、IIR 数字滤波器设计、FIR 数字滤波器设计、平稳信号分析、非平稳信号分析、高斯信号分析以及信号处理的 GUI 实现。其中，信号与系统基础知识包括连续信号与模型、离散信号与模型；常用信号变换包括 Z 变换、Chirp Z 变换、FFT 变换、DCT 变换和 Hilbert 变换等；离散系统结构包括 IIR、FIR 和 Lattice 结构；IIR 滤波器设计包括模拟和数字低通、高通、带通与带阻滤波器设计，以及基于冲激响应不变法和双线性 Z 变换法的 IIR 滤波器设计等；FIR 滤波器设计包括基于

窗函数、频率抽样法和切比雪夫逼近法的 FIR 滤波器设计；平稳信号分析包括经典功率谱估计、基于参数模型的功率谱估计和基于非参数模型的功率谱估计；非平稳信号分析包括 STFT 变换、Gabor 展开、Wigner-Ville 分布与 Choi-Williams 分布；非高斯信号分析包括基于非参数法的双谱估计、基于参数模型的双谱估计，以及双谱估计的应用；信号处理的 GUI 实现包括滤波器设计与分析的 FDATool 工具和滤波器设计与信号分析的 SPTool 工具。

神经网络理论与 MATLAB 7 实现

以最新推出的神经网络工具箱 4.0.3 版为基础。本书前两章介绍了 MATLAB 7 和神经网络的基础知识，对神经网络工具箱的重要的函数分门别类地进行了详细介绍，并给出了完整的示例。从第 3 章到第 5 章，分别介绍了几种比较重要的神经网络类型，包括感知器、线性网络和 BP 网络等，介绍了这些网络的结构及学习算法，以及 MATLAB 的实现方法。第 6 章介绍了神经网络的图形用户接口，后 5 章分别讲述了如何利用神经网络工具箱解决控制一些应用领域中的实际问题。

总之，这套书涵盖了 MATLAB 使用基础、高级编程和重要领域的应用，相信这套丛书的推出，将为 MATLAB 工程技术人员提供最权威最系统的知识参考，帮助他们快速解决学习、科研和工程实际中面临的问题。

本丛书由电子工业出版社飞思科技产品研发中心策划并组织编写，葛哲学负责统稿。丛书作者均为博士、硕士和大学教师，都具有非常扎实的理论功底，并有非常丰富的 MATLAB 使用经验。

我们的联系方式如下：

咨询电话：(010) 68134545 68131648

电子邮件：support@fecit.com.cn

服务网址：<http://www.fecit.com.cn> <http://www.fecit.net>

通用网址：计算机图书、飞思、飞思教育、飞思科技、FECIT

飞思科技产品研发中心

前 言

数字信号处理 (Digital Signal Processing, DSP) 是一种交叉性的学科。它的理论基础涉及到众多的学科,但其成果又为这些学科的发展起着重要的促进作用;它的应用范围甚广,如通信、航天航空、雷达、声呐、地震勘探,以及生物医学等领域。因此,它已经成为理论与实践并重,在高新技术领域中占有重要地位的新兴学科。

MATLAB 是数字信号处理技术实现的重要手段。随着信号处理应用领域的不断扩大,一般的信号处理方法难以完全满足实际工程的需要,从而促使人们在信号处理理论和方法方面不断创新与探索,例如从线性因果最小相位系统的研究到非线性非因果非最小相位系统的研究,从平稳高斯信号的分析到非平稳非高斯信号的分析。另一方面, MATLAB 的信号处理工具箱也随着信号处理理论与方法的发展而丰富,例如从经典的平稳信号分析工具箱扩充到非平稳信号的时频分析工具箱和非高斯的高阶谱分析工具箱等。也就是说, MATLAB 信号处理工具箱随着信号处理理论与方法的发展而发展,同时,又为信号处理理论与方法的实现及工程应用提供了有效的帮助。

随着信号处理技术和 MATLAB 的迅速发展,新的信号处理算法也随之诞生,新的 MATLAB 信号处理工具箱的内容也随之变换。在此之际,我们编写了《MATLAB 7 辅助信号处理技术》一书。本书是关于信号处理技术及其 MATLAB 实现与应用的专业书籍。全书共分 9 章,其内容安排如下:

第 1 章系统地介绍了连续信号、离散信号、连续系统模型和离散系统模型的定义与性质,以及其信号产生和系统模型建立的 MATLAB 实现;

第 2 章主要介绍了常用信号的 Z 变换、Chirp Z 变换、离散傅里叶变换 (FFT)、离散余弦变换 (DCT) 和 Hilbert 变换的定义、性质、计算方法、MATLAB 实现及其工程应用;

第 3 章给出了离散系统结构的基本原理与组成,以及 IIR 系统结构、FIR 系统结构和 Lattice 结构介绍与 MATLAB 实现;

第 4 章详细讲述了滤波器的基本原理,模拟低通、高通、带通、带阻 IIR 滤波器的设计,基于冲激响应不变法和双线性 Z 变换法的 IIR 滤波器设计,数字高通、带通和带阻 IIR 滤波器设计,以及基于 MATLAB 函数直接设计 IIR 滤波器;

第 5 章详细讲述了 FIR 滤波器的特性,基于窗函数的 FIR 数字低通、高通、带通和带阻滤波器设计,基于频率抽样法和切比雪夫逼近法的 FIR 数字滤波器的设计,以及基于 MATLAB 函数直接设计 FIR 数字滤波器;

第 6 章重点给出了平稳信号的描述,基于相关函数、直接法、间接法、改进直接法和多窗口法的经典功率谱估计,基于 AR、MA 和 ARMA 参数模型的功率谱估计,以及基于 MUSIC 算法和特征值分解的非参数模型的功率谱估计,并且通过 MATLAB 将这些分析方法与数字滤波器结合起来,对平稳信号进行分析处理;

第 7 章讨论了非平稳信号的 STFT 变换、Gabor 展开、Wigner-Ville 分布与 Choi-Williams

分布的定义、性质，以及其 MATLAB 实现和非平稳信号分析；

第 8 章主要讨论了高阶累计量与高阶谱的定义、性质，基于非参数法的双谱估计和基于 AR、MA 和 ARMA 参数模型的双谱估计，并讨论了双谱估计的 MATLAB 实现及其在有色高斯噪声中的信号检测与信号延迟估计；

第 9 章介绍了滤波器设计与分析工具 FDATool 及滤波器设计与信号分析工具 SPTool，并利用 FDATool 和 SPTool 工具对滤波器进行设计与分析，还利用 SPTool 工具对信号及其频谱进行分析和比较。

总体来说，本书的特点如下：

(1) 理论与实际紧密结合

本书注重于信号处理的基础理论与重要算法的讨论，并通过 MATLAB 的信号处理工具箱实现算法的工程应用。

(2) 内容全面，结构合理

本书首先阐述了信号与系统的基础理论、系统结构和滤波器的设计，然后讨论了平稳信号、非平稳信号和高斯信号的分析，最后介绍了信号处理的 GUI 实现。

(3) 内容新颖

本书所介绍的滤波器设计工具箱 V2.5 和信号处理工具箱 V6.1 都是 MATLAB 7 的内容；并且讨论了非平稳信号和非高斯信号处理方法的 MATLAB 实现及其工程应用。

(4) 适用面广

本书适合信号处理、自动控制、机械电子、机械制造与自动化、电力电气、通信工程等专业大学本科生、研究生、教师和科技工作者阅读。

本书由飞思科技产品研发中心策划并组织编写，谢光军、葛哲学、廖剑利、张丽娜等负责第 1, 2, 3, 6 章；谢光军、谢光益、朱国强、潘薇、陈仲生等负责第 4, 5, 9 章；卿慧玲、李浩明、邱忠、安卫华等负责第 7, 8 章；谢光军、葛哲学负责全书的统稿与审校工作。此外，刘瑛、张建、肖俊、安莹、孙金华、刘美琴、张珏琼、郭玉玲、王勇、葛诚、胡雷、胡艳、黄朝峰、孙志强等参与了本书的材料整理和实验验证工作，并为编者提供了大量的帮助，在此一并表示感谢！

由于信号处理理论不断发展，MATLAB 所涉及的知识面极为宽广，书中难免存在某些疏漏和错误，本书作者恳切期望得到各方面专家和广大读者的批评指正。

编 者

目 录

第 1 章 信号与系统	1
1.1 连续信号及其 MATLAB 实现	2
1.1.1 单位冲激信号	2
1.1.2 任意函数	5
1.1.3 单位阶跃函数	6
1.1.4 斜坡函数	8
1.1.5 实指数函数	9
1.1.6 正弦函数	10
1.1.7 指数调制正弦函数	11
1.2 离散信号及其 MATLAB 实现	13
1.2.1 单位冲激序列	13
1.2.2 任意序列	14
1.2.3 单位阶跃序列	15
1.2.4 斜坡序列	16
1.2.5 正弦序列	17
1.2.6 复正弦序列	18
1.2.7 实指数序列	19
1.2.8 复指数序列	20
1.2.9 随机序列	20
1.3 离散信号的基本运算	21
1.3.1 信号的延迟	22
1.3.2 信号相加	23
1.3.3 信号相乘	24
1.3.4 信号乘以标量值	25
1.3.5 信号翻转	26
1.3.6 信号和	27
1.3.7 信号积	27
1.3.8 信号能量	28
1.4 噪声及波形信号的产生	28
1.4.1 square 函数	29
1.4.2 sawtooth 函数	29
1.4.3 chirp 函数	30
1.4.4 dirichlet 函数	32

1.4.5	sinc 函数	32
1.4.6	rectpuls 函数	33
1.4.7	gauspuls 函数	34
1.4.8	tripuls 函数	35
1.4.9	pulstran 函数	36
1.5	连续系统的模型及其 MATLAB 实现	38
1.5.1	连续系统的性质	38
1.5.2	连续系统的模型	40
1.5.3	连续系统模型的 MATLAB 实现	43
1.6	离散系统的模型及其 MATLAB 实现	47
1.6.1	离散系统的性质	48
1.6.2	离散线性系统模型	51
1.6.3	离散线性系统模型的 MATLAB 实现	56
1.6.4	离散系统之间相互转换的 MATLAB 工具箱	65
第 2 章	信号变换	67
2.1	Z 变换及 MATLAB 实现	67
2.1.1	Z 变换的定义	68
2.1.2	Z 变换的收敛域	68
2.1.3	Z 逆变换	70
2.1.4	Z 变换的性质	72
2.1.5	Z 变换的工程应用	74
2.2	Chirp Z 变换及 MATLAB 实现	77
2.2.1	Chirp Z 变换的定义	77
2.2.2	Chirp Z 变换的计算方法	79
2.2.3	Chirp Z 变换的 MATLAB 实现	80
2.3	离散傅里叶变换及 MATLAB 实现	82
2.3.1	离散傅里叶变换定义	82
2.3.2	离散傅里叶变换的 MATLAB 实现	84
2.3.3	离散傅里叶变换性质	86
2.3.4	离散傅里叶变换的 FFT 算法	95
2.3.5	离散傅里叶变换 FFT 算法的应用	98
2.4	DCT 变换及 MATLAB 实现	99
2.4.1	DCT 变换的定义	100
2.4.2	DCT 变换的 MATLAB 实现	101
2.5	Hilbert 变换及 MATLAB 实现	103
2.5.1	Hilbert 变换的定义	103
2.5.2	Hilbert 变换的 MATLAB 实现	104
2.5.3	Hilbert 变换的性质	105

第3章 离散系统结构	109
3.1 离散系统结构的基本原理	109
3.1.1 离散系统结构的分类	109
3.1.2 离散系统结构的基本组成	109
3.2 IIR 系统结构及 MATLAB 实现	110
3.2.1 直接 I 型	111
3.2.2 直接 II 型	111
3.2.3 级联型	113
3.2.4 并联型	118
3.3 FIR 系统结构及 MATLAB 实现	122
3.3.1 直接型	123
3.3.2 级联型	123
3.3.3 线性相位型	124
3.3.4 频率取样型	126
3.4 Lattice 结构及 MATLAB 实现	131
3.4.1 全零点 FIR 系统的 Lattice 结构	131
3.4.2 全极点 FIR 系统的 Lattice 结构	136
3.4.3 零极点 ARMA 系统的 Lattice 结构	140
第4章 IIR 数字滤波器设计	147
4.1 滤波器的基本原理	147
4.1.1 滤波原理	147
4.1.2 滤波器的分类	148
4.1.3 滤波器的技术要求	150
4.2 模拟低通滤波器设计	152
4.2.1 巴特沃斯低通滤波器的设计	154
4.2.2 切比雪夫低通滤波器的设计	159
4.2.3 椭圆低通滤波器的设计	165
4.3 模拟高通、带通与带阻滤波器设计	169
4.3.1 模拟高通滤波器的设计	169
4.3.2 模拟带通滤波器的设计	171
4.3.3 模拟带阻滤波器的设计	173
4.4 基于冲激响应不变法的 IIR 滤波器设计	175
4.5 基于双线性 Z 变换法的 IIR 滤波器设计	179
4.6 数字高通、带通及带阻 IIR 滤波器设计	183
4.6.1 基于原型滤波器转换法的 IIR 数字滤波器设计	183
4.6.2 基于直接数字域法的 IIR 数字滤波器设计	194
4.7 基于 MATLAB 函数直接设计 IIR 数字滤波器	198
4.7.1 基于巴特沃斯法直接设计 IIR 数字滤波器	198

4.7.2	基于切比雪夫法直接设计 IIR 数字滤波器	200
4.7.3	基于椭圆法直接设计 IIR 数字滤波器	203
4.7.4	基于 Yule-Walk 法直接设计 IIR 数字滤波器	205
4.7.5	基于 Prony 法直接设计 IIR 数字滤波器	206
4.7.6	基于线性预测法直接设计 IIR 数字滤波器	207
4.7.7	基于 Steiglitz-McBride 法直接设计 IIR 数字滤波器	209
4.7.8	基于反向频率法直接设计 IIR 数字滤波器	210
第 5 章	FIR 数字滤波器设计	213
5.1	FIR 数字滤波器的特性	213
5.1.1	FIR 滤波器的线性相位特性	214
5.1.2	FIR 滤波器的幅频特性	216
5.2	常用窗函数及 MATLAB 实现	218
5.2.1	矩形窗 (Rectangular window)	219
5.2.2	三角窗 (Triangular window)	220
5.2.3	汉宁窗 (Hanning window)	222
5.2.4	海明窗 (Hamming window)	223
5.2.5	布拉克曼窗 (Blackman window)	224
5.2.6	切比雪夫窗 (Chebyshev window)	225
5.2.7	巴特利特窗 (Bartlett window)	226
5.2.8	凯塞窗 (Kaiser window)	228
5.2.9	各种窗函数的性能比较	229
5.3	基于窗函数的 FIR 数字滤波器设计	229
5.3.1	数字低通滤波器的窗函数设计	230
5.3.2	数字高通滤波器的窗函数设计	235
5.3.3	数字带通滤波器的窗函数设计	240
5.3.4	数字带阻滤波器的窗函数设计	246
5.4	基于频率抽样法的 FIR 滤波器设计	248
5.5	基于切比雪夫逼近法的 FIR 滤波器设计	258
5.5.1	切比雪夫一致逼近原理	258
5.5.2	基于切比雪夫一致逼近原理的 FIR 滤波器设计	259
5.6	基于 MATLAB 函数直接设计 FIR 数字滤波器	263
5.6.1	基于窗函数法直接设计 FIR 数字滤波器	264
5.6.2	基于切比雪夫逼近法直接设计 FIR 数字滤波器	269
5.6.3	基于约束最小二乘法直接设计 FIR 数字滤波器	274
5.6.4	基于 Remez 扩展算法直接设计非线性相位 FIR 数字滤波器	277
5.6.5	基于升余弦法直接设计 FIR 数字滤波器	280
5.7	FIR 滤波器与 IIR 滤波器的比较	281

第 6 章 平稳信号分析	283
6.1 平稳信号的描述	284
6.1.1 平稳信号的定义	284
6.1.2 平稳信号的时域描述	284
6.1.3 平稳信号的频域描述	292
6.2 经典功率谱估计	293
6.2.1 相关函数估计	293
6.2.2 基于直接法的功率谱估计	299
6.2.3 基于间接法的功率谱估计	302
6.2.4 基于改进直接法的功率谱估计	303
6.2.5 基于多窗口法的功率谱估计	309
6.3 基于参数建模的功率谱估计	311
6.3.1 基于 AR 模型的功率谱估计	312
6.3.2 基于 MA 模型的功率谱估计	329
6.3.3 基于 ARMA 模型的功率谱估计	331
6.3.4 基于最小方差的功率谱估计	334
6.4 基于非参数建模的功率谱估计	337
6.4.1 相关矩阵的特征分解	337
6.4.2 基于 MUSIC 算法的功率谱估计	339
6.4.3 基于特征向量的功率谱估计	342
6.4.4 信号与噪声子空间维数估计	344
第 7 章 非平稳信号分析	347
7.1 STFT 变换及其 MATLAB 实现	348
7.1.1 STFT 变换的定义	348
7.1.2 STFT 变换的时频分辨率	350
7.1.3 STFT 变换的 MATLAB 实现	351
7.2 Gabor 展开及其 MATLAB 实现	354
7.2.1 连续 Gabor 展开	354
7.2.2 离散 Gabor 展开	355
7.2.3 Gabor 时频谱的 MATLAB 实现	356
7.3 Wigner-Ville 分布及其 MATLAB 实现	358
7.3.1 Wigner-Ville 分布的定义	358
7.3.2 Wigner-Ville 分布的性质	359
7.3.3 Wigner-Ville 分布的离散化	362
7.3.4 伪 Wigner-Ville 分布	363
7.3.5 Wigner-Ville 分布的 MATLAB 实现	364
7.4 Choi-Williams 分布及其 MATLAB 实现	367

第 8 章 非高斯信号分析	369
8.1 累积量与高阶谱定义	369
8.1.1 随机变量的特征函数	370
8.1.2 矩的定义	370
8.1.3 累积量的定义	371
8.1.4 高阶谱的定义	372
8.2 累积量与高阶谱的性质	373
8.2.1 累积量的性质	374
8.2.2 高阶谱的性质	374
8.3 基于非参数法的双谱估计	375
8.3.1 直接法	375
8.3.2 间接法	378
8.4 基于参数模型的双谱估计	382
8.4.1 AR、MA 与 ARMA 模型阶次的确定	383
8.4.2 基于非高斯 AR 模型的双谱估计	386
8.4.3 基于非高斯 MA 模型的双谱估计	391
8.4.4 基于非高斯 ARMA 模型的双谱估计	394
8.5 基于双谱的有色高斯噪声信号检测	401
8.6 基于双谱的信号延迟估计	403
第 9 章 信号处理 GUI 实现	407
9.1 滤波器设计与分析工具 (FDATool)	407
9.1.1 FDATool 快速入门	407
9.1.2 滤波器设计	412
9.1.3 滤波器导入	415
9.1.4 滤波器导出	416
9.1.5 滤波器建模	416
9.1.6 滤波器量化	417
9.1.7 滤波器转换	418
9.1.8 滤波器分析	419
9.1.9 滤波器 MATLAB 脚本文件的生成	423
9.2 滤波器设计与信号分析工具 (SPTool)	424
9.2.1 SPTool 快速入门	424
9.2.2 信号的时域分析	431
9.2.3 滤波器设计、编辑与分析	434
9.2.4 信号的频域分析	442
参考文献	449

第1章 信号与系统

信号传输系统中，传输主体是信号，而系统中所包含的各种电路、设备则是实施信号传输的手段。因此电路、设备的设计和制造要求，必然取决于信号的特征。所以，信号分析具有重要的意义。

广义而言，信号是随着时间变化的某种物理量，是传递信息的载体，可以表示为一个时间的函数。所以在信号分析中，信号和函数两个词语经常相互通用。当信号是一个确定的时间函数时，给定某一时间值，就可以确定其相应的函数值，这样的信号是确定信号。但是，带有信息的信号往往具有不确定性，它们是一种随机信号。随机信号不能用确定的时间函数来表示，当给定某一时间值时，其函数值并不能确定，只能知道此信号取某一数值时的概率。从严格意义上说，除了实验室发生的有规律的信号外，一般的信号都是随机的。对于信号的接收端而言，如果接收的信号是完全确定的时间函数，就不可能由它得到任何新的信息，因而就失去了传输信号的目的。但是对于确定信号的分析仍然具有重要的意义，因为有些实际信号与确定信号有相近的特性，例如音乐在一定时间内近似于周期信号。从这一意义上讲，确定信号是一种近似的、理想化的信号，作这样的处理，可以使问题的分析大为简化，以便于工程上的实际应用。在信号的传输过程中，除了带有有用信息的信号之外，同时还会夹杂着如噪声、干扰等无用信号，它们具有更大的随机性质。

根据信号的时间连续或离散，通常信号可以分为两类：

(1) 连续信号：在连续时间范围内定义的信号值，信号的幅值可以是连续数值，也可以是离散数值。当信号幅值连续时，称之为模拟信号。实际上连续时间信号与模拟信号常常通用。

(2) 离散信号：时间为离散变量的信号，即独立变量时间被量化。它只在离散时间上给出函数值，是时间上不连续的“序列”。离散时间的间隔是均匀的，通常以 T 表示， $x(nT)$ 表示此离散时间信号在 nT 点上的值，但实际应用中一般直接以 $x(n)$ 表示离散时间信号。当信号的幅值也离散化时，则此时的离散信号又称为数字信号。

所谓系统当然不限于通信系统、自动控制系统，它也包括诸如机械系统、化工系统之类的其他物理系统，还包括如生产管理、交通运输等社会经济方面的系统。从一般的意义上说，系统是一个由若干互有关联的单元组成的，并具有某种功能用来达到某些特定目的的有机整体。例如它的组成单元可以是一些巨大的机器设备，甚至包括工作人员，这些单元组成一个庞大的体系去完成某种极其复杂的任务；简单的组成单元也可以仅仅是一些电阻、电容元件连接起来称为具有某种简单功能的电路。这些单元及其组成体系也可以是非物理实体。

按照系统的特性可以将其分为线性系统和非线性系统两类。一般而言，线性系统是由线性元件组成的系统，非线性系统则是含有非线性元件的系统。但是非线性元件在一定的工作条件下，也可以看成是一个线性系统，所以对于线性系统应该由它的特性来规定其确切的含

义。系统又可以根据其是否包含随时间变化参数的元件而分为非时变系统和时变系统。非时变系统又称时不变系统或定常系统，它的性质不随时间变化，或者说它具有响应的形状不随激励施加的时间不同而改变的性质。这种系统一般由定常的元件构成。时变系统中包含时变元件，这些元件的参数是某种时间的函数；根据系统传输和处理信号的性质，又可以分为连续系统和离散系统。连续系统传输和处理连续信号，它的激励和响应在连续时间的一切值上都有确定的意义，而离散系统的激励与响应信号则是不连续的离散序列。例如，计算机就是一种典型的离散时间系统。在实际工作中，离散时间系统常常与连续时间系统联合运用，同时包含两者的系统称为混合系统，数字通信系统和自动控制系统等都属此类系统。连续时间系统和离散时间系统可以是线性的或非线性的，同时也可以是时变的或非时变的。本章所讨论的系统为线性时不变（LTI）系统，它在信号分析中占有重要的地位。

本章主要内容包括:

- 典型连续信号及其 MATLAB 实现
- 典型离散信号及其 MATLAB 实现
- 离散信号的基本运算
- 噪声与波形信号的产生
- 连续系统的基本性质
- 连续系统的模型及其 MATLAB 实现
- 离散系统的基本性质
- 离散系统的模型及其 MATLAB 实现
- 离散系统之间转换的 MATLAB 工具箱

1.1 连续信号及其 MATLAB 实现

连续信号又称为模拟信号，其信号存在于整个时间范围内，包括单位冲激信号，单位阶跃信号、斜坡信号、实指数信号、正弦信号，指数调制正弦信号、锯齿波、周期锯齿波、三角波及任意信号等。

本节主要内容包括:

- 单位冲激信号及 MATLAB 实现
- 任意函数及 MATLAB 实现
- 单位阶跃函数及 MATLAB 实现
- 斜坡函数及 MATLAB 实现
- 实指数函数及 MATLAB 实现
- 正弦函数及 MATLAB 实现
- 指数调制正弦函数及 MATLAB 实现

1.1.1 单位冲激信号

在连续时间系统研究中，单位冲激是一种重要的信号。任何一种模拟信号都能通过冲

激给予近似, 通过系统对冲激输入的响应可以求得对所有其他输入信号的响应。

单位冲激信号 $\delta(t)$ 也称为得耳塔 (Delta) 函数或狄拉克 (Dirac) 分布, 定义如下:

$$\begin{cases} \delta(t) = 0, & t \neq 0 \\ \int_{-\varepsilon}^{\varepsilon} \delta(t) dt = 1, & \forall \varepsilon > 0 \end{cases} \quad (1-1)$$

第一个条件表明 $\delta(t)$ 在所有 t 不为 0 时取值为 0, 第二个条件就是冲激下的面积为 1, 因此 $\delta(t)$ 函数具有单位面积的特性。

特别需要指出的是, $\delta(t)$ 在 $t=0$ 点的值 $\delta(0)$ 是没有定义的, $\delta(0)$ 并不等于无穷。冲激信号 $\delta(t)$ 可以近似地用一个位于原点处、幅度为 A 、持续时间为 $1/A$ 的脉冲来表示, 这里 A 是一个很大的正值。图 1-1(a) 就是用脉冲表示的 $\delta(t)$ ($t=1/A=1/50$)。

对于任何实数 K , $K\delta(t)$ 的面积为 K , 定义如下:

$$\begin{cases} K\delta(t) = 0, & t \neq 0 \\ \int_{-\varepsilon}^{\varepsilon} K\delta(t) dt = K, & \forall \varepsilon > 0 \end{cases} \quad (1-2)$$

$K\delta(t)$ ($K=3$) 函数如图 1-1(b) 所示。

当冲激函数 $\delta(t)$ 存在并移 k 时, 其加权时移冲激函数 $K\delta(t-k)$ 定义如下:

$$\begin{cases} K\delta(t-k) = 0, & t \neq 0 \\ \int_{-\varepsilon}^{\varepsilon} K\delta(t-k) dt = K, & \forall \varepsilon > 0 \end{cases} \quad (1-3)$$

图 1-1(c) 所示就是加权时移冲激函数 $K\delta(t-k)$ ($K=3, k=1$) 的图形。

图 1-1(a)、图 1-1(b) 和图 1-1(c) 所示的单位脉冲、加权单位冲激和加权移位冲激的 MATLAB 实现程序分别如例程 1-1、例程 1-2 和例程 1-3 所示。

【例 1-1】 $t=1/A=1/50$ 时, 单位脉冲 $\delta(t)$ 的 MATLAB 实现程序如例程 1-1 所示。

例程 1-1 单位冲激响应

```
% exa 1-1_unit_pulse_c.m for example 1-1
% unit pulse response
```

```
clear all;
t1 = -0.5:0.001:0;
A = 50;
A1 = 1/A;
n1 = length(t1);
u1 = zeros(1, n1);
t2 = 0:0.001:A1;
t0 = 0;
u2 = A * stepfun(t2, t0);
t3 = A1:0.001:1;
n3 = length(t3);
u3 = zeros(1, n3);
t = [t1 t2 t3];
u = [u1 u2 u3];
```

```
plot(t,u)
axis([-0.5 1 0 A+2])
```

【例 1-2】加权单位冲激 $3\delta(t)$ 的 MATLAB 实现程序如例程 1-2 所示。

例程 1-2 加权单位冲激响应

```
% exa 1-2_weight_unit_pulse_c.m for example 1-2
% weighted unit pulse response

clear all;
t1=-0.5:0.001:1;
K=3;
n1=length(t1);
u=zeros(1,n1);
t2=-0.5:0.001:0;
n2=length(t2);
u(n2)=K;
plot(t1,u)
axis([-0.5 1 0 3.2])
```

【例 1-3】加权移位冲激 $3\delta(t-1)$ 的 MATLAB 实现程序如例程 1-3 所示。

例程 1-3 加权移位冲激响应

```
% exa 1-3_weight_shift_unit_pulse_c.m for example 1-3
% weighted shift unit pulse response

clear all;
t1=-0.5:0.001:2;
K=3;
n1=length(t1);
u=zeros(1,n1);
t2=-0.5:0.001:1;
n2=length(t2);
u(n2)=K;
plot(t1,u)
axis([-0.5 2 0 3.2])
```

冲激响应函数的一个很重要的性质就是筛选性质，即：

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(t)\delta(t-\tau)dt = f(\tau)$$

该式中的 $f(t)$ 对全部的 τ 而言都是连续的。