

MATLAB工程应用丛书

5

基于

MATLAB 6.X

MATLAB

辅助现代工程数字信号处理



李勇 徐震 等编著



西安电子科技大学出版社

<http://www.xduph.com>

MATLAB 工程应用丛书

MATLAB 辅助现代工程 数字信号处理

李 勇 徐 震 等编著

西安电子科技大学出版社

2 0 0 2

内 容 简 介

本书系统地讲述了工程数字信号处理的基本知识和 MATLAB 语言在工程数字信号处理领域的应用。内容包括:离散时间信号和系统及其分析方法,工程 IIR、FIR 数字滤波器的设计与分析,平稳与非平稳随机信号分析及其应用,同态信号处理与应用,自适应信号处理与应用,Kalman 波形估计与应用,高阶谱分析及其应用,多抽样率信号处理及其应用等。

本书内容简明扼要,包含了大量的 MATLAB 语言源程序,对具体工程应用有较大的参考价值。

本书适用于对现代工程数字信号处理技术感兴趣的读者朋友,也可作为高年级本科生、研究生学习数字信号处理的参考书以及科研与工程技术人员实用的工具书。

图书在版编目(CIP)数据

MATLAB 辅助现代工程数字信号处理/李勇等编著.

—西安:西安电子科技大学出版社,2002.10

(MATLAB 工程应用丛书)

ISBN 7-5606-1139-7

I. M… II. 李… III. 数字信号—信号处理—计算机辅助计算—软件包, MATLAB N. TN911.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 037970 号

策 划 毛红兵

责任编辑 杨宗周

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)

电 话 (029)8227828 邮 编 710071

http://www.xduph.com E-mail: xdupfxb@pub.xaonline.com

经 销 新华书店

印 刷 陕西光大印务有限责任公司

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

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 16.375

字 数 385 千字

印 数 1~4 000 册

定 价 22.00 元

ISBN 7-5606-1139-7/TP·0579

XDUP 1410001-1

* * * 如有印制问题可调换 * * *

本书封面贴有西安电子科技大学出版社的激光防伪标志,无标志者不得销售。

前 言

随着科学技术的发展,人们认识客观世界的技术也在不断地进步与更新,在计算机领域内,人们更愿意用更加形象、直观和具有洞察力的方法去解决工程应用中的各种问题。MATLAB 语言正是在这种趋势下进入科学与工程技术领域的。

MATLAB 语言作为一种强大的科学计算工具,受到了专业研究人员的广泛重视。无论是在统计、信号处理、人工智能与自动控制,还是在雷达、通信、计算机等领域,越来越多的工程技术人员摆脱了 C 及 C++ 语言繁琐语法的束缚,从而能够更专心地将注意力集中在专业内技术研究的核心问题上。

在现代科学技术领域里,电子信息系统的应用范围极为广泛,主要有通信、导航、雷达、声纳、地震勘探、医学仪器、振动工程和射电天文等等。在短短几十年的时间里,这些系统几经更新换代,发展极其迅速。系统的发展进程和信息的利用程度是分不开的,而信息的利用程度又和信号与信息处理技术的发展紧密相连。

20 世纪 40 年代,在检测、估计、滤波等方面就建立了一系列基础理论和方法,为电子信息系统的发展指明了方向。但是,由于当时技术条件的限制,优化系统难以实现,实际应用的只是一些简单的处理技术。

20 世纪 60 年代以来,随着微电子集成电路技术、工艺的迅猛发展,信号处理的研究不仅限于一般理论和方法的探讨,而且更多地侧重于实现方面,新的实现方法与算法的成果层出不穷。在此基础上发展起来的新一代系统,其优化和自适应性能已大大提高。

如今,信号处理又进入了一个新的发展时期,信号处理的一些主要领域,如优化、自适应、高分辨、多维和多通道等,其理论和方法均日趋系统化。对系统的分析已不再限于理想模型,而是考虑各种实际因素,研究其鲁棒性,同时对性能也不再限于定性描述,而要作出统计性能评价,使理论和实际在更高水平上密切结合。

信号处理应用领域的不断扩大,也促使人们在理论和方法上向更深层次探索,此前均假设信号及其背景噪声是高斯的、平稳的,而对信号的分析只是基于它的二阶矩特性和功率谱,其对象系统也限于时不变的线性和因果最小相位系统。虽然上述假设及由此而构建的系统在许多场合是适用的,但随着应用领域的扩大,要求人们去研究非平稳、非高斯信号,以及时变、非因果、非最小相位、非线性系统,这些已成为现代信号处理研究热点的一个方面,如用时频分布和子波变换研究非平稳信号、用高阶统计量分析非高斯信号等也属于这类研究。

根据当前该学科理论与实际密切结合的特点,本书突出了基本概念和基本思想的阐明,同时注重了理论的严密性和方法的实用性,使读者易于领会和掌握问题的实质,并能较快地用以解决实际问题。

本书内容简明扼要,包含了大量的 MATLAB 语言源程序,所有源程序都在计算机上用 MATLAB5.3 和 MATLAB6.1 进行了验算,对具体工程应用具有较大的参考价值。

本书由李勇、徐震、沈辉、张亮、徐凯等编写；文字由李飞、刘涛、李凯、王华等录入；图像由李燕、胡利明、曾飞、刘丽等编辑处理；全书由沈辉、李勇、林哲辉审校。本书在编写过程中还得到了王德军、赵文峰等人的帮助，毛红兵女士为本书的策划工作付出了大量的心血与汗水。另外还有很多同志在本书的编辑、排版、校对过程中付出了大量的劳动，在此一并表示衷心的感谢。

由于时间仓促以及作者本身水平有限，书中错误之处在所难免，敬请各位专家和广大读者批评指正，作者不胜感激。

作 者
2002 年 8 月

目 录

第一章 离散时间系统与 Z 变换	1
1.1 引言	1
1.2 离散时间信号	1
1.2.1 离散时间信号的基本概念	1
1.2.2 离散时间信号的分类	7
1.2.3 离散时间信号的运算	9
1.2.4 MATLAB 常用信号生成函数	11
1.2.5 MATLAB 信号数据的载入	12
1.3 离散时间系统	13
1.3.1 离散时间系统的基本概念	13
1.3.2 线性时不变系统(LSI)的输入、输出关系	14
1.3.3 离散时间信号的相关函数	15
1.3.4 差分方程	20
1.4 Z 变换	22
1.4.1 Z 变换的定义	22
1.4.2 Z 变换的收敛域	23
1.4.3 Z 变换的性质	24
1.4.4 离散时间系统的 MATLAB 描述和转换	24
1.5 小结	28
第二章 离散傅里叶变换	29
2.1 引言	29
2.2 离散傅里叶级数(DFS)	29
2.2.1 DFS 的定义	30
2.2.2 DFS 的性质	34
2.3 离散傅里叶变换(DFT)	36
2.3.1 离散傅里叶变换(DFT)的定义	36
2.3.2 补零 DFT	39
2.3.3 离散傅里叶变换(DFT)的性质	42
2.3.4 DFT 的应用	46
2.4 快速傅里叶变换(FFT)	49
2.4.1 FFT 的基本思想及其实现	49
2.4.2 FFT 的应用	52
2.5 傅里叶信号分析	54
2.6 小结	62
第三章 数字滤波器及其结构	63
3.1 引言	63

3.2 滤波器的原理及分类	63
3.2.1 滤波器的基本概念	63
3.2.2 滤波器的分类	64
3.2.3 工程滤波器的技术指标要求	65
3.2.4 滤波器的 MATLAB 实现	67
3.3 数字滤波器的原理	73
3.3.1 数字滤波器概述	73
3.3.2 数字滤波器的分类	74
3.3.3 数字滤波器的工作原理	74
3.4 数字滤波器的结构	75
3.4.1 IIR 数字滤波器的结构	75
3.4.2 FIR 数字滤波器基本结构	81
3.5 小结	82
第四章 工程数字滤波器的设计	83
4.1 引言	83
4.2 IIR 数字滤波器的设计	83
4.2.1 IIR 滤波器的经典设计	83
4.2.2 工程 IIR 滤波器的直接设计	92
4.2.3 最大平滑 IIR 数字滤波器设计	93
4.3 工程 FIR 数字滤波器的设计	95
4.3.1 窗函数法设计 FIR 数字滤波器	96
4.3.2 频率采样法设计 FIR 滤波器	99
4.3.3 最优化法设计 FIR 滤波器	101
4.4 小结	104
第五章 平稳随机信号分析	105
5.1 引言	105
5.2 平稳随机信号的描述	105
5.2.1 平稳随机信号的时域描述	105
5.2.2 平稳随机信号的频域描述	110
5.3 相关函数的估计与应用	111
5.3.1 相关函数的估计	111
5.3.2 相关函数的应用	112
5.4 功率谱估计与应用	114
5.4.1 周期图法	115
5.4.2 改进的周期图法	117
5.4.3 多窗口法	123
5.4.4 最大熵法	124
5.4.5 特征向量法	126
5.5 小结	127
第六章 交互式图形用户界面	128
6.1 引言	128
6.2 滤波器设计与分析工具(FDATool)	128

6.2.1	FDATool 用户界面的组成	128
6.2.2	滤波器的设计与编辑	130
6.2.3	滤波器的分析	132
6.3	信号频谱分析和滤波设计工具(SPTool)	134
6.3.1	SPTool 用户界面的组成	134
6.3.2	信号的时域分析	136
6.3.3	滤波器设计、编辑和观察	139
6.3.4	信号的频谱分析	143
6.3.5	SPTool 参数设置	145
6.4	小结	146
第七章	同态信号处理	147
7.1	引言	147
7.2	同态系统	147
7.3	卷积同态信号处理	148
7.3.1	典范系统	149
7.3.2	系统的数学表示	149
7.3.3	复倒谱的性质	151
7.3.4	具体应用分析	155
7.4	小结	159
第八章	Kalman 波形估计及其应用	160
8.1	引言	160
8.2	算法原理及其 MATLAB 实现	160
8.3	Kalman 波形估计在雷达数据处理中的应用	168
8.3.1	目标跟踪的基本方法	169
8.3.2	机动模型的滤波跟踪	171
8.4	小结	186
第九章	自适应信号分析与处理	187
9.1	引言	187
9.2	LMS 自适应滤波器	187
9.2.1	LMS 算法基本原理	188
9.2.2	LMS 算法性能简析	190
9.2.3	基本 LMS 自适应算法	190
9.3	自适应噪声对消器	191
9.4	自适应信号分离器	192
9.5	自适应陷波器	194
9.6	小结	196
第十章	非平稳信号分析与处理	197
10.1	引言	197
10.2	短时傅里叶分析	197
10.2.1	时域窗法	198
10.2.2	频域窗法	198
10.2.3	不确定性原理	199

10.3 维格纳时频分布	205
10.3.1 连续时间 WD 分布	205
10.3.2 离散时间 WD 分布	209
10.4 小结	218
第十一章 随机信号的高阶谱分析	219
11.1 引言	219
11.2 高阶累积量与高阶谱	219
11.2.1 累积量	219
11.2.2 高阶谱	221
11.3 累积量与双谱的性质	221
11.3.1 累积量的性质	221
11.3.2 双谱的性质	221
11.4 双谱估计	222
11.4.1 非参数化双谱估计	222
11.4.2 参数化双谱估计	226
11.5 高阶谱分析的应用	233
11.5.1 利用双谱进行时延估计	233
11.5.2 噪声中信号检测	236
11.6 小结	238
第十二章 多速率数字信号处理	239
12.1 引言	239
12.2 信号整数倍抽取	239
12.2.1 抽取过程的时域描述	239
12.2.2 抽取过程的频域描述	240
12.2.3 抽取过程的实际结构	240
12.3 信号整数倍插值	243
12.3.1 插值过程的时域描述	243
12.3.2 插值过程的频域描述	244
12.3.3 插值过程的实际结构	244
12.4 信号有理数倍速率转换	246
12.4.1 信号有理数倍速率转换实现结构	246
12.4.2 信号有理数倍速率转换频谱变化	246
12.5 小结	248
附录 信号处理工具箱函数	249
参考文献	253

第一章 离散时间系统与 Z 变换

本章主要内容:

- ★ 离散时间信号
- ★ 离散时间系统
- ★ Z 变换

1.1 引言

随着近代科学技术的发展,特别是超大规模集成电路的出现,数字计算机的广泛应用,使得离散时间信号与离散时间系统日益复杂,也促进了其理论研究的发展。工程数字信号处理的目的是把它们改变成在某种意义上更为希望的或易于识别的形式,以便估计信号的特征参量或削弱信号中的多余分量以及增强信号中的有用分量,从而提取有用信息。当需要分离以某种形式组合起来的两个或多个信号,或者需要提高信号的某个分量,估计信号的某些参数时,均需通过设计适当的系统,对原始信号进行变换而实现。

在离散时间系统分析中,对系统数学模型的求解方法来讲,基本上可分为时域方法和变换域方法两类。时域法是直接分析时间变量的函数,研究离散时间系统的时域特性。对于输入、输出描述的数学模型,可求解常系数线性差分方程。在线性系统时域分析方法中,卷积方法非常重要,它是分析线性系统简单而有效的方法。变换域方法是將离散时间信号与离散时间系统的时间变量函数变换成相应变换域的某个变量函数。例如,傅里叶变换(FT)是以角频率 ω 作为变量的函数,利用FT来研究系统的频率特性;Z变换(ZT)则注重研究零点与极点分布,对系统进行 z 域分析。变换域方法可以将分析中的差分方程转换为代数方程,或将卷积积分与卷积和转换为乘法运算,使得对离散时间信号与离散时间系统的分析、求解过程变得简单而方便。

本章与第二章是分析现代工程数字信号、解决实际工程问题的基础。本章讨论了有关离散时间信号与离散系统的定义、分类方法及其基本特性,并介绍了研究离散时间信号与系统的 z 域分析方法。着重介绍了离散时间信号的函数表示与波形表示,研究了线性时不变离散系统的特性。

1.2 离散时间信号

1.2.1 离散时间信号的基本概念

广义地说,信号是随时间变化的某种物理量。在通信技术中,一般将语言、文字、图像

或数据等统称为消息，在消息中包含有一定数量的信息。但是，信息的传送一般都不是直接的，它必须借助于一定形式的信号（光信号、声信号、电信号等），才能远距离快速传输和进行各种处理。因而，信号是消息的表现形式，它是通信传输的客观对象，而消息则是信号的具体内容，它蕴藏在信号之中。信号可视作随时间变化的电压或电流，在某些情况下，也可以是电荷或磁通。由于信号是随时间而变化的，在数学上可以用时间 t 的函数 $x(t)$ 来表示，因此，一个信号 $x(t)$ ，它可以代表一个实际的物理信号，也可以是一个数学函数。例如， $x(t) = A \sin(2\pi ft)$ ，这既是正弦信号，也是正弦函数。因此信号和函数往往是通用的，正如随机信号与数学上的随机过程一样。

信号的特性可以从两个方面来描述，即时间特性和频率特性。信号可以写成数学表达式，即是时间 t 的函数，它具有一定的波形，因而表现出一定波形的时间特性，如出现时间的先后、持续时间的长短、重复周期的大小及随时间变化的快慢等。另一方面，任意信号在一定条件下总可以分解为许多不同频率的正弦分量，即具有一定的频率成分，因而表现为一定波形的频率特性，如含有大小不同的频率分量、主要频率分量占有不同的范围等。

信号的形式之所以不同，是因为它们各自有不同的时间特性和频率特性，而信号的时间特性和频率特性有着对应的关系，不同的时间特性将导致不同的频率特性的出现。若 t 是定义在时间轴上的连续变量，那么，我们称 $x(t)$ 为连续时间信号，又称模拟信号。若 t 仅在时间轴的离散点上取值，那么，我们称 $x(t)$ 为离散时间信号 (discrete time signal)，表示为 $x(nT)$ 。 T 表示相邻两个点之间的时间间隔，也称为抽样周期 (sampling periodic)， n 取整数并代表时间的离散时刻。一般，我们可以把 T 归一化为 1，这样 $x(nT)$ 可简记为 $x(n)$ 。这样表示的 $x(n)$ 仅是整数 n 的函数，所以又称 $x(n)$ 为离散时间序列 (discrete time series)。

注意：这里特别强调序列 $x(n)$ 只在 n 为整数上才有意义，而对于非整数的 n 值是没有意义的，不能视为零。

在 MATLAB 中，我们可以用一个列向量来表示一个有限长度的序列。然而这样一个向量并没有包含采样时刻的信息。因此要完整地表示序列 $x(n)$ ，应包含表示 x 和 n 两个向量。例如序列

$$x(n) = [3, 1, 3, 0, 3, 4, 6, 1, 0]$$

在 MATLAB 中应表示为

$$n = [-2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6]; \quad x = [3, 1, 3, 0, 3, 4, 6, 1, 0]$$

当不需要采样位置信息或这个信息是多余的时候（例如该序列从 $n=0$ 开始），我们可以只用 x 向量来表示。

注意：由于有限的内存，MATLAB 无法表示一个任意无限序列。

为了分析的方便，在数字信号处理理论和算法中定义了一些基本的、典型的序列，它们的定义和在 MATLAB 中的表达式如下。

1. 单位抽样序列

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

在 MATLAB 中, 利用函数 `zeros(1, N)` 可以实现有限长区间的 $\delta(n)$, 也可以用逻辑关系式 $n=0$ 来实现 $\delta(n)$ 。例如实现

$$\delta(n) = \begin{cases} 1, & n = n_0 \\ 0, & n \neq n_0 \end{cases}$$

在区间 $[n_1, n_2]$ 内的值, 我们可以用如下程序来实现。

【例 1.1】 用 MATLAB 编写生成单位抽样序列的程序, $n \in [n_1, n_2]$ 。

```
Function [x, n]=delta(n0, n1, n2)
%产生 x(n)=delta(n-n0); n1<=n<=n2;
n=[n1: n2];
x=[(n-n0)==0];
```

2. 单位阶跃序列

$$U(n) = \begin{cases} 1, & n \geq 0 \\ 0, & n < 0 \end{cases}$$

在 MATLAB 中, 利用函数 `ones(1, N)` 可以实现有限长区间的 $u(n)$, 也可以用逻辑关系式 $n \geq 0$ 来实现 $u(n)$ 。例如实现

$$u(n) = \begin{cases} 1, & n \geq n_0 \\ 0, & n < n_0 \end{cases}$$

在区间 $[n_1, n_2]$ 内的值, 我们可以用如下程序来实现。

【例 1.2】 用 MATLAB 编写生成单位阶跃序列的程序, $n \in [n_1, n_2]$ 。

```
Function [x, n]=step_seq(n0, n1, n2)
%产生 x(n)=u(n-n0); n1<=n<=n2;
n=[n1: n2];
x=[(n-n0)>=0];
```

一种特殊的常用序列——矩形序列, 定义为

$$R_N = \begin{cases} 1, & 0 \leq n \leq N-1 \\ 0, & n < 0, n > N-1 \end{cases}$$

产生矩形序列的方法类同于单位阶跃序列, 只是令 $n_1=0$, $n_2=N$ 即可。

3. 单位斜坡序列

$$x(n) = \begin{cases} 0, & n < 0 \\ n, & n \geq 0 \end{cases}$$

例如实现在区间 $[n_1, n_2]$ 内的单位斜坡序列 $x(n)$, 我们可以用如下程序来实现。

【例 1.3】 用 MATLAB 编写生成单位斜坡序列的程序, $n \in [n_1, n_2]$ 。

```
Function [x, n]=Ramp_seq(n1, n2)
%产生 x(n)=ramp(n); n1<=n<=n2;
n=[n1: 0.1: n2];
x=n;
stem(n, x, ' ');
xlabel('n'); ylabel('x(n)'); title('Ramp Sequence');
grid;
```

4. 正余弦序列

$$x(n) = A \cos(\omega_0 n + \varphi), \quad \forall n$$

其中 A 为幅度, φ 为以弧度为单位的相角。在 MATLAB 中, 利用函数 $\cos$ (或 $\sin$) 可以实现有限长区间的正余弦序列。例如实现

$$x(n) = 5 \sin\left(0.5\pi n + \frac{\pi}{4}\right) - \cos(0.2\pi n)$$

在区间 $[n_1, n_2]$ 内的值, 我们可以用如下程序来实现。

【例 1.4】 用 MATLAB 编写生成正余弦序列的程序, $n \in [n_1, n_2]$ 。

```
Function [x, n]=Sin_seq(n1, n2)
%产生 x(n)=Sin_seq(n); n1<=n<=n2;
n=[n1:n2];
x=5*sin(0.5*pi*n+pi/4)-cos(0.2*pi*n);
stem(n, x, ' ');
xlabel('n'); ylabel('x(n)'); title('Sin Sequence');
grid;
```

5. 实指数序列

$$x(n) = a^n, \quad \forall n, a \in R$$

在 MATLAB 中, 利用数组运算符“.”^”可以实现有限长区间的实指数序列。例如实现 $x(n)=0.6^n$ 在区间 $[n_1, n_2]$ 内的值, 我们可以用如下程序来实现。

【例 1.5】 用 MATLAB 编写生成实指数序列的程序, $n \in [n_1, n_2]$ 。

```
n=[n1:n2];
x=0.6.^n;
stem(n, x, ' ');
xlabel('n'); ylabel('x(n)'); title('Real Power Sequence');
grid;
```

6. 复指数序列

$$x(n) = e^{sn} = e^{(\sigma + j\omega)n}$$

复指数序列 e^{sn} 的指数因子 $s = \sigma + j\omega$ 为复数, 称为复频率。借助欧拉公式可展开为

$$x(n) = e^{\sigma n} (\cos \omega n + j \sin \omega n)$$

式中实部 $\text{Re}(n) = e^{\sigma n} \cos \omega n$, 虚部 $\text{Im}(n) = e^{\sigma n} \sin \omega n$, 模 $|x(n)| = e^{\sigma n}$ 。

复指数信号的波形随 s 的不同而不同。当 $s=0$ 时, $x(n)$ 为直流信号; 当 $\omega=0$ 时, $x(n) = e^{sn} = e^{\sigma n}$ 就成为一个单调增长或衰减的实指数信号, 如图 1.1(a) 所示; 当 $\sigma=0$ 时, $x(n) = \cos \omega n + j \sin \omega n$, 其实部是一个等幅余弦信号, 虚部是一个等幅正弦信号, 图 1.1(b) 画出了其实部的波形。在一般情况下, e^{sn} 的实部是一个增幅 ($\sigma > 0$) 或减幅 ($\sigma < 0$) 的余弦信号, 虚部是一个增幅 ($\sigma > 0$) 或减幅 ($\sigma < 0$) 的正弦信号, 图 1.1(c) 和 (d) 画出了两种不同 σ 的实部波形。

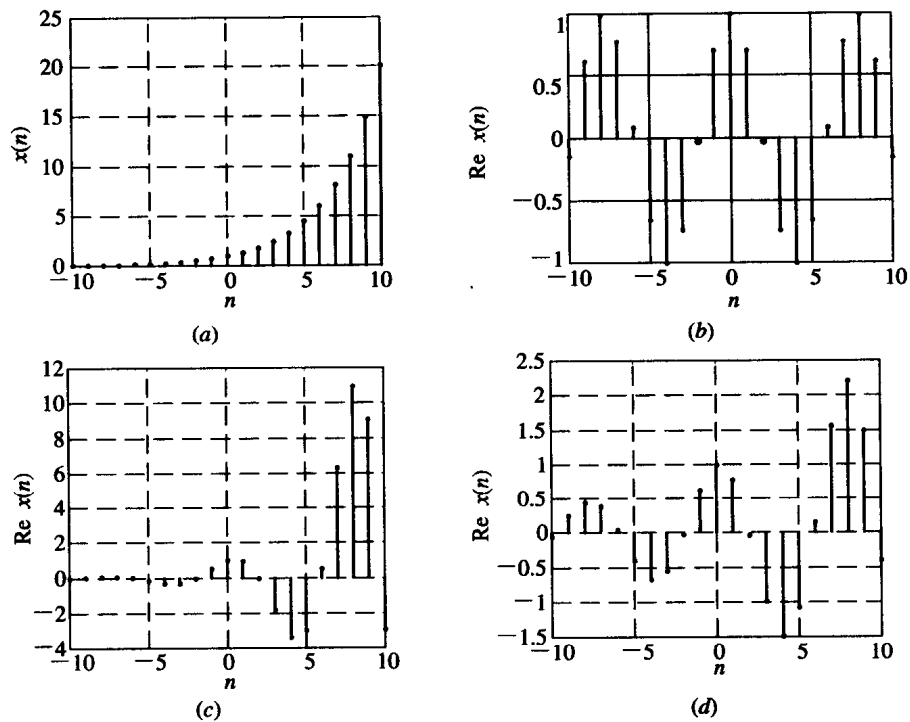


图 1.1 复指数信号

(a) $\omega=0$ 的情形; (b) 当 $\sigma=0$ 时实部的波形;

(c) $\sigma=0.3$ 时实部的波形; (d) $\sigma=0.1$ 时实部的波形

【例 1.6】 用 MATLAB 编写生成复指数序列的程序, $n \in [-10, 10]$ 。

```
%产生复指数序列
n=[-10:10];
%当  $\omega=0$  时的情形
s=0.3;
x=exp(s * n);
figure(1);
stem(n, x, '.');
xlabel('n'); ylabel('x(n)'); title('Power Sequence');
%当  $\sigma=0$  时的情形
s=j * 0.8;
x=exp(s * n);
Real_x=real(x);
figure(2);
stem(n, Real_x, '.');
xlabel('n'); ylabel('Real_x(n)'); title('Power Real Part Sequence');
grid;
```

```

%在一般情况下
s=0.3+j*0.8;
x=exp(s*n);
Real_x=real(x);
figure(3);
stem(n, Real_x, '.');
xlabel('n'); ylabel('Real_x(n)');
title('Power Real Part Sequence'); grid;

```

由于复指数信号能概括多种情况,所以可利用它来描述多种基本信号,如直流信号、指数信号、等幅或增幅以及减幅的正弦或余弦信号。因此,复指数信号是信号与系统分析中经常遇到的重要信号。

7. 线性调频序列

线性调频信号是一种在雷达或通信系统中经常用到的信号,其定义式为

$$x(n) = \mu_{\text{LFM}}(n) = \exp(j\pi bn^2), \quad n_1 \leq n \leq n_2$$

式中, b 为线性调频扫描频率, $|b| = \frac{D}{T_p^2}$, D 为脉压比, T_p 为脉冲信号的宽度。

【例 1.7】 用 MATLAB 编写生成线性调频序列的程序。

MATLAB 程序如下:

```

%产生线性调频序列
function y=LFM_seq(D, be, Tp, s) %线性调频
%D 为脉冲的压缩比
%Tp 为矩形脉冲宽度(单位为微秒)
%be 为调频信号的起始时间
%s 为计算的精度
b=D/(Tp^2); %b 为线性的调频扫描频率
ss=1/s;
for t=be: s: (Tp+be)
    n=(t-be)*ss+1;
    y(n)=exp(j*pi*b*t*t);
end
Real_x=real(y);
Imag_x=imag(y);
subplot(2, 1, 1);
plot(n, Real_x);
xlabel('n'); ylabel('Real_x(n)'); title('Sequence');
grid;
subplot(2, 1, 2);
plot(n, Imag_x);
xlabel('n'); ylabel('Imag_x(n)'); title('Sequence');
grid;

```

程序运行结果如图 1.2 所示。

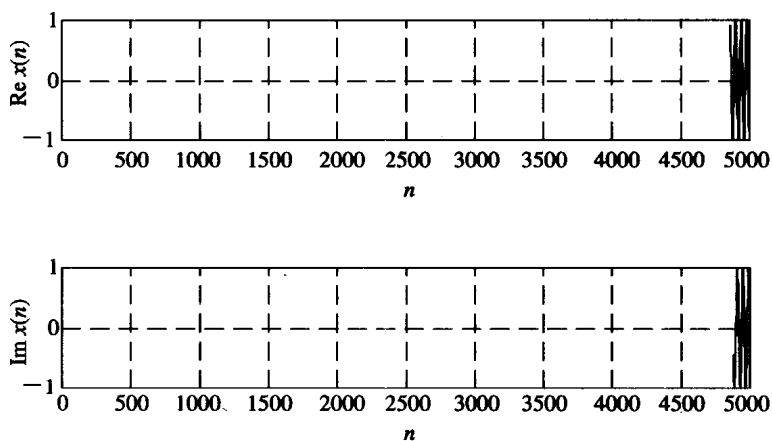


图 1.2 线性调频序列 ($D=128$, $be=0$, $T_p=51$, $s=0.01$)

8. 随机序列

在 MATLAB 中提供了两个产生随机序列的函数：

`rand(1, N)` 用于产生 $[0, 1]$ 上均匀分布的随机序列，长度为 N ；

`randn(1, N)` 用于产生均值为 0，方差为 1 的高斯随机序列，长度为 N 。

可以由上述两个函数生成其它分布的随机序列，如下例。

【例 1.8】 用 MATLAB 编写生成 $[a, b]$ 上均匀分布随机序列的程序。

```
function y=Rand_ab(N, a, b)
% 用于产生[a, b]上均匀分布的 N 点随机序列；
% N 为随机序列的长度；
x=rand(1, N);
y=a+(b-a)*x;
plot(y);
grid;
```

【例 1.9】 用 MATLAB 编写生成均值为 a ，方差为 b 的高斯随机序列的程序。

```
function y=Randn_ab(N, a, b)
% 用于产生均值为 a，方差为 b 的 N 点高斯随机序列
% N 为随机序列的长度
x=randn(1, N);
y=a+sqrt(b)*x;
plot(y);
grid;
```

1.2.2 离散时间信号的分类

不同的信号其处理方法会有较大的差异，可以从以下几个角度对离散时间信号进行分类。

1. 连续时间信号和离散时间信号

按照时间取值的连续性划分，信号可分为连续时间信号和离散时间信号，简称连续信

号和离散信号,它们的区别是时间变量的取值方式。

连续信号是指在所讨论的时间内,对任意时刻(除若干个不连续点外)都有定义的信号,通常用 $f(t)$ 表示。

离散信号是指只在某些不连续规定的时刻有定义,而在其它时刻没有定义的信号。

2. 周期信号和非周期信号

按信号(函数)的周期性划分,信号又可以分为周期信号与非周期信号。

周期信号是指每隔一定时间 T ,周而复始且无始无终的信号,即对信号 $x(n)$,若有 $x(n) = x(n \pm kN)$, k 和 N 均为正整数,则称 $x(n)$ 为周期信号,满足此关系式的最小 N 值称为信号的周期。只要给出此信号在任一周期内的变化过程,便可确知它在任一时刻的数值。

非周期信号在时间上不具有周而复始的特性。非周期信号也可以看作为一个周期 N 趋于无穷大时的周期信号。

注意:并不是所有的正弦序列都是周期序列!

如正弦序列

$$x(n) = A \sin(\omega_0 n + \varphi)$$

$$x(n + N) = A \sin(\omega_0 n + \omega_0 N + \varphi)$$

只有当 $\omega_0 N = 2\pi k$, k 为整数,才是周期信号,周期为 $N = \frac{2\pi k}{\omega_0}$ 。

(1) $\frac{2\pi}{\omega_0}$ 为整数,周期为 $\frac{2\pi}{\omega_0}$;

(2) $\frac{2\pi}{\omega_0}$ 为有理数, $\frac{2\pi}{\omega_0} = \frac{P}{Q}$, Q 、 P 互素。 $k=P$, 即 $N=Q$ 时为最小整数,周期 $N > \frac{2\pi}{\omega_0}$;

(3) $\frac{2\pi}{\omega_0}$ 为无理数, $x(n)$ 不是周期序列。

3. 确定性信号和随机信号

按时间函数的确定性划分,信号可分为确定性信号和随机信号两类。

信号 $x(n)$ 在任意时刻 n 时的值若能够被精确地确定(或是被预测),那么,我们说 $x(n)$ 是一个确定性的信号,如我们熟知的正弦信号、周期脉冲信号等。随机信号 $x(n)$ 在时刻 n 的取值是随机的,不能给以精确的预测,通常只知道它取某一数值的概率,如噪声信号等。

随机信号又可以分为平稳随机信号和非平稳随机信号,在本书第五章中将介绍如何分析和处理平稳随机信号,在第十章中介绍如何分析和处理非平稳随机信号。

4. 能量信号和功率信号

按时间函数的可积性划分,信号可以分为能量信号、功率信号和非功率能量信号。

对离散信号 $x(n)$,如果其能量 $E < \infty$,我们称 $x(n)$ 为能量有限信号,简称为能量信号; $E = \infty$,则称为能量无限信号。

若信号能量 E 无限,则研究其功率 P ,若 $P < \infty$,则称 $x(n)$ 为有限功率信号,简称为功率信号。

一般来说,周期信号都是功率信号;非周期信号是能量信号或者是功率信号。属于能量信号的非周期信号称为脉冲信号,它在有限时间范围内有一定的数值。