



普通高等院校电子信息类应用型规划教材

数字信号处理及应用 实验教程与习题解答

王永玉 孙 衢 编著

SHUZI XINHAO

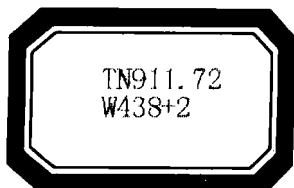
CHULI JI FENXI YU CHONG

SHIYAN JIAOCHENG YU XITI JIEDA

11.72
8+2



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com



普通高等院校电子信息类应用型规划教材

数字信号处理及应用 实验教程与习题解答

王永玉 孙 衢 编著

北京邮电大学出版社
·北京·

内 容 简 介

本书是《数字信号处理及应用》一书的配套实验教材,配合《数字信号处理及应用》各章的教学,安排了相应的实验。内容包括:MATLAB 入门及常见信号的产生和显示;离散系统的差分方程以及离散序列的卷积运算分析;离散信号和系统的 z 变换分析;周期信号的离散傅里叶级数及有限长序列的离散傅里叶变换(DFT);快速傅里叶变换(FFT)算法;数字滤波器的设计及实现。在本书的最后还给出了上机作业的参考程序和《数字信号处理及应用》一书中各章的习题解答。

“数字信号处理”是一门实践性很强的课程,本书配合数字信号处理的基础理论设计了相应的实验,这对于学习和掌握数字信号处理的理论和实践技术具有重要的意义。

图书在版编目(CIP)数据

数字信号处理及应用实验教程与习题解答/王永玉,孙衢编著. —北京:北京邮电大学出版社,2009
ISBN 978-7-5635-2099-2

I. 数… II. ①王…②孙… III. 数字信号—信号处理—高等学校—教学参考资料 IV. TN911.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 174995 号

书 名: 数字信号处理及应用实验教程与习题解答

作 者: 王永玉 孙 衢

责任编辑: 毋燕燕

出版发行: 北京邮电大学出版社

社 址: 北京市海淀区西土城路 10 号(邮编:100876)

发 行 部: 电话: 010-62282185 传真: 010-62283578

E-mail: publish@bupt.edu.cn

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京市梦宇印务有限公司

开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16

印 张: 9.5

字 数: 227 千字

印 数: 1—3 000 册

版 次: 2009 年 10 月第 1 版 2009 年 10 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5635-2099-2

定 价: 18.00 元

• 如有印装质量问题,请与北京邮电大学出版社发行部联系 •

前 言

“数字信号处理”这门课程是各高等院校电子、信息类专业的一门非常重要的专业基础课,本书配合“数字信号处理”这门课程的理论教学,设置了相应的基于 MATLAB 的实验课程以补充理论教学,帮助读者理解所学的概念和算法。

本书所用的编程语言是 MATLAB,它是一种用于科学计算且功能很强的高级程序设计语言,广泛用于高性能可视化数值计算。MATLAB 语言基本的语法、句型类似 C 语言,如果学习过 C 语言,就可以很快掌握它的使用。由于 MATLAB 主要用来解决数值复杂的工程问题,离开了实际课题则很难学习和掌握它,因此,学习 MATLAB 最好的方法是在课题的应用中来领会它。

本书假定读者不具备 MATLAB 的基础知识,而是通过本书前一部分验证性的实验,来逐步掌握这种在信号处理方面能解决重要问题的实用语言。随着读者对 MATLAB 语言的熟悉,本书后一部分逐步增加了设计性的实验,要求读者编写必要的 MATLAB 程序,有利于加深对原理的理解,加强对数字信号处理技术的应用。相信读者通过学习经测试过的、完整的程序,可以逐步编写一些简易的程序,最终能够掌握利用 MATLAB 来解决复杂的问题。

全书共 8 个实验,内容安排如下。

实验 1 首先介绍 MATLAB 的一些基本功能,让读者能尽快了解 MATLAB 的使用方法,然后采用 MATLAB 实践数字信号处理中常用的一些信号的产生和显示。

实验 2 通过 MATLAB 上机练习,帮助读者理解离散序列的卷积运算和离散时间序列的傅里叶变换,学习使用 MATLAB 求解离散系统的差分方程和频率响应等方法,加深对信号的采样和恢复过程以及相关理论的理解。

实验 3 通过 MATLAB 上机练习,帮助读者理解傅里叶分析方法的推广—— z 变换。学习采用 z 变换来分析信号和系统的频域特性的方法,并用 MATLAB 实现。加深对离散系统的频率响应分析和零、极点分布概念的理解。

实验 4 通过 MATLAB 上机练习,帮助读者理解有限长序列的离散傅里叶变换及其性质。学习采用 DFT 来分析信号的频谱和求解线性时不变系统的输出的方法,并用 MATLAB 实现。加深对频域采样定理的理解。

实验 5 通过 MATLAB 上机练习,加深对离散序列的 DFT 的理解,学习 FFT 算法的应用。

实验 6 学习 MATLAB 中 IIR 滤波器设计的相关函数的使用,掌握使用 MATLAB 来设计 IIR 滤波器的过程。加深对数字滤波器常用指标的理解。

实验 7 学习 MATLAB 中 FIR 滤波器设计的相关函数的使用,掌握使用 MATLAB 来设计 FIR 滤波器的过程。

实验 8 学习 MATLAB 中 IIR 滤波器和 FIR 滤波器实现的相关函数。通过 MATLAB 仿真来验证系数量化对滤波器性能的影响。

本书中的每个实验都包含许多适于读者实现的例子,例题后面附有读者需要思考或练习的问题,这些例题和习题帮助读者学习 MATLAB 的使用和数字信号处理的重要概念。在本书的最后还给出了实验中所提出的设计问题的参考程序和《数字信号处理及应用》理论教材的习题解答。

作 者

目 录

第 1 部分 数字信号处理基础实验

实验 1	MATLAB 入门及常见信号的产生和显示	3
实验 2	离散序列的卷积和系统差分方程的 MATLAB 实现	14
实验 3	z 变换和系统频域特性的 MATLAB 实现	22
实验 4	离散傅里叶变换的 MATLAB 实现	28
实验 5	快速傅里叶变换及应用	40
实验 6	基于 MATLAB 的 IIR 滤波器设计	43
实验 7	基于 MATLAB 的 FIR 滤波器设计	57
实验 8	基于 MATLAB 的数字信号处理系统的实现	67

第 2 部分 数字信号处理基础实验参考程序

实验 1	参考程序	79
实验 2	参考程序	80
实验 3	参考程序	82
实验 4	参考程序	85
实验 5	参考程序	91
实验 6	参考程序	92
实验 7	参考程序	94

第 3 部分 数字信号处理及应用习题解答

第 2 章	离散时间信号与系统习题解答	99
第 3 章	z 变换习题解答	110
第 4 章	离散傅里叶变换习题解答	116
第 5 章	快速傅里叶变换习题解答	126
第 6 章	IIR 数字滤波器设计习题解答	128
第 7 章	FIR 数字滤波器设计习题解答	135
第 8 章	数字信号处理系统的实现习题解答	140
参考文献		144

第 1 部分

数字信号处理基础实验

实验 1 MATLAB 入门及常见信号的产生和显示

数字信号处理这门课程的实践性很强,如果没有通过计算机进行练习与操作,有些概念会很难理解,将直接影响到学习的效果。MathWorks 公司的 MATLAB 软件以矩阵和向量的运算以及运算结果的可视化为基础,将数值分析、矩阵计算、函数生成、信号输出、图形及图像处理、建模与仿真等诸多强大功能集成在一个便于用户使用的交互式环境之中,成为一种功能很强的技术工具,自 1984 年推向市场以来,历经十几年的发展和竞争,现已成为国际公认的最优秀的科技应用软件,其应用已广泛渗透到各个领域,尤其是信号处理和自动控制等领域。在欧美的高等院校,MATLAB 已经成为学习数值分析、线性代数、自动控制理论、数理统计、数字信号处理、现代通信原理等课程的基本教学工具,成为大学生、研究生必须掌握的基本技能。本实验首先让初学 MATLAB 的读者能尽快地了解 MATLAB 的一些基本功能,然后使用 MATLAB 实践常见信号的产生和显示。

1.1 实验目的

- (1) 学习 MATLAB 的使用方法及基本功能。
- (2) 熟悉单位采样序列、单位阶跃序列、矩形序列和指数序列等常用序列的产生。
- (3) 掌握利用 MATLAB 画图函数显示信号波形的方法。

1.2 实验内容

1. 学习 MATLAB 的使用方法及基本功能

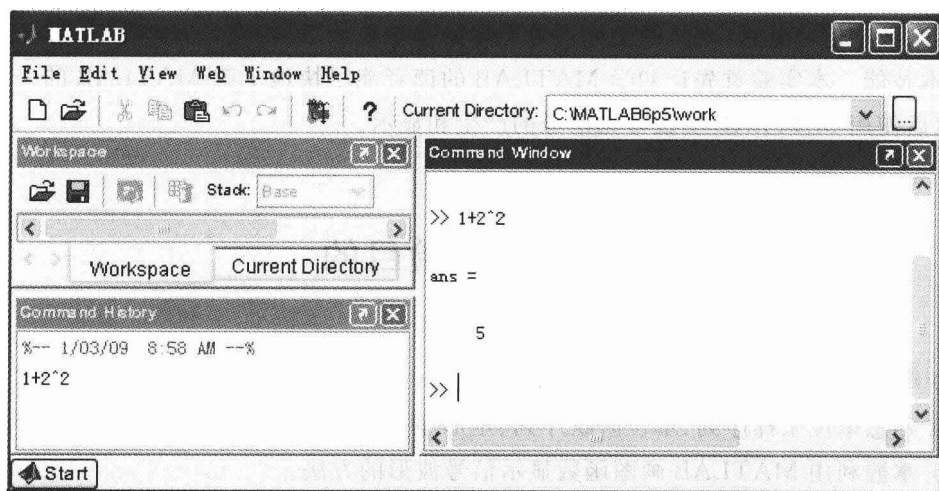
MATLAB 是由美国 MathWorks 公司推出的软件产品。“MATLAB”是 Matrix Laboratory 的缩写,意为“矩阵实验室”。MATLAB 是一完整的并可扩展的计算环境,是一种进行科学和工程计算的交互式程序语言。它的基本数据单元是不需要指定维数的矩阵,它可

直接用于表达数学的算式和技术概念,而普通的高级语言只能对一个个具体的数据单元进行操作,因此解决同样的数值计算问题,使用 MATLAB 要比使用 Basic、Fortran 和 C 等语言效率提高许多倍,许多人赞誉它为万能的数学“演算纸”。

MATLAB 采用开放式的环境,可以读到它的源码,了解它的算法,并能改变当前的函数或增添自己编写的函数。MATLAB 是一种非常流行的计算机语言,许多重要学术刊物上发表的论文均是用 MATLAB 来分析计算以及绘制出各种图形。它还是一个有力的教学工具,在大学的线性代数课程以及其他领域的高一级课程的教学,已成为标准的教学工具。现今 MATLAB 的发展已大大超出了“矩阵实验室”的范围,在许多国际一流专家学者的支持下,MathWorks 公司还为 MATLAB 配备了涉及自动控制、信息处理、计算机仿真等种类繁多的工具箱(Tool boxes),这些工具箱有:数理统计、信号处理、系统辨识、最优化等。在近年来的一些新兴学科方向,MathWorks 公司也很快地开发了相应的工具箱,如神经网络、模糊逻辑等。

下面来学习 MATLAB 的基本的使用方法。

首先双击桌面上 MATLAB 应用程序的图标 ,将会出现如实验图 1-1 所示的操作界面。

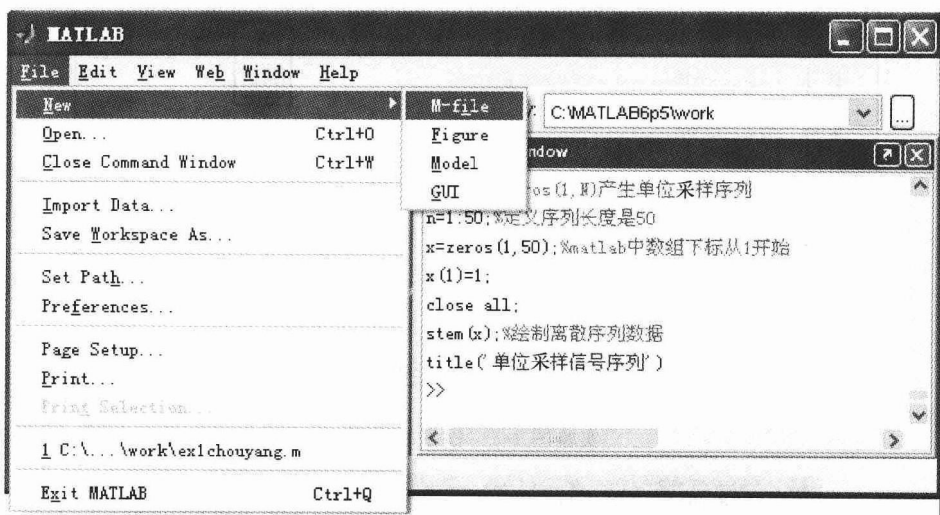


实验图 1-1 MATLAB 的操作界面

其中 Command Window 是最常用的窗口,它可以作为最简单的计算器使用,如实验图 1-1 窗口所示,显示了计算“ $1+2^2$ ”的表达式及运算结果。此外,在此窗口中还可以输入 DOS 下的各种常用命令,如改变目录命令“cd”,显示文件及文件夹命令“dir”及帮助命令“help”等来实现相应的功能。在 Command Window 窗中运用 who, whos 可以查阅 MATLAB 内存变量。

除了在 Command Window 键入所需要的操作外,还可以将所需要的操作写入一个文件,建立 M 脚本文件,如实验图 1-2 所示。也可以用其他的编辑器(如“ultraedit”,“notepad”)来编写,只要最后文件名保存为“*.m”即可。M 脚本文件便于保存和调用。实验图 1-2 中右上方的长条框中显示的是新建文件所在的目录,采用其他方式建立文件时要注意文件存放的目录。目

前,国内有关 MATLAB 的书很多,如果想进一步学习和了解此软件可以参看参考文献[1-8]。



实验图 1-2 建立 M 脚本文件



思考与练习

- ① 在 Command Window 中键入自己熟悉的一些指令,观察现象。
- ② 单击 MATLAB 环境下各个菜单,了解其功能。

2. 常用离散序列的产生和图形显示

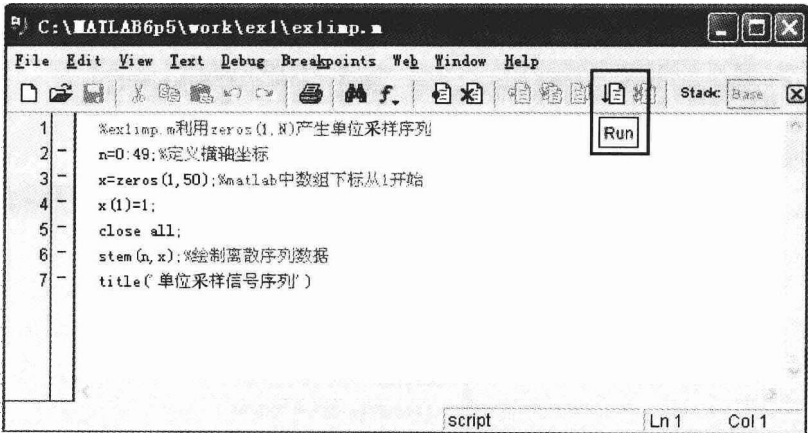
【例 1-1】 产生单位采样序列 $\delta(n)$

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

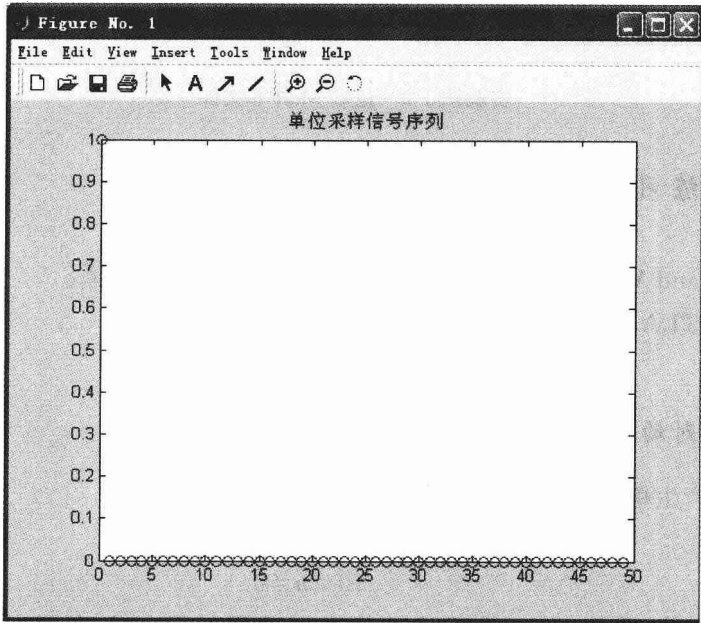
在 MATLAB 中,函数 `zeros(1,N)` 产生一个 N 个零的行向量,利用它可以实现在有限区间上的单位采样序列。按照前面所述的方法,将下列指令编辑到“`exlimp.m`”文件中。

```
% exlimp.m 利用 zeros(1,N) 产生单位采样序列
n = 0:49; % 定义横轴坐标
x = zeros(1,50); % matlab 中数组下标从 1 开始
x(1) = 1;
close all;
stem(n,x); % 绘制离散序列数据
title('单位采样信号序列')
```

文件编辑后保存,然后单击实验图 1-3 中的“Run”图标,运行“`exlimp.m`”将产生如实验图 1-4 所示序列。



实验图 1-3 程序的运行



实验图 1-4 单位采样序列



思考与练习

- ① 将例 1-1 程序中的 $n=0:49$ 改为 $n=1:50$, 观察现象。
- ② 采用 `help` 指令了解画图语句 `stem` 的功能, 并通过程序进行学习和验证。

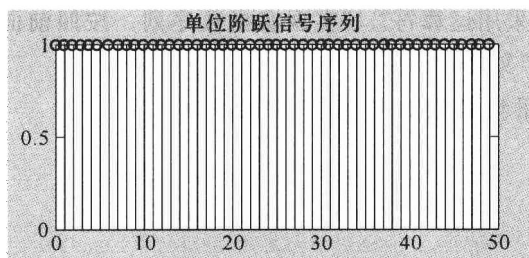
【例 1-2】 产生单位阶跃序列 $u(n)$

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

在 MATLAB 中,函数 `ones(1,N)`产生一个 N 个 1 的行向量,利用它可以实现在有限区间上的单位阶跃序列。按照前面所述的方法,将下列指令编辑到“`ex1step.m`”文件中。

```
% ex1step.m 利用 ones(1,N)产生单位阶跃序列
n = 0:49;           % 定义横轴坐标
x = ones(1,50);      % matlab 中数组下标从 1 开始
close all;
stem(n,x);           % 绘制离散序列数据
title('单位阶跃信号序列')
```

文件编辑后保存,然后单击“Run”图标运行“`ex1step.m`”,将产生如实验图 1-5 所示序列。



实验图 1-5 单位阶跃序列

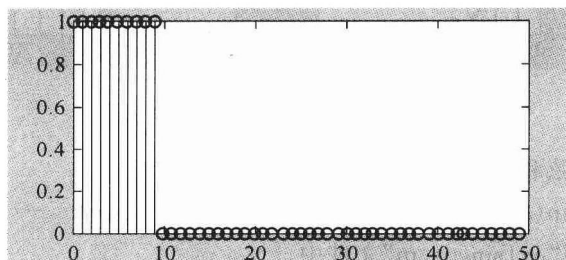
【例 1-3】 产生矩形序列 $R_N(n)$

$$R_N(n) = \begin{cases} 1 & 0 \leq n \leq N-1 \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

MATLAB 中,符号函数 `sign(x)`在 x 大于 0 时其值为 1;在 x 等于 0 时其值为 0;在 x 小于 0 时其值为 -1。利用它可以实现窗长度为 N 的矩形序列。按照前面所述的方法,将下列指令编辑到“`ex1rectang.m`”文件中。

```
% ex1rectang.m 利用 sign(x)产生矩形序列
N = 10;
n = 0:49;
x = sign(sign(N-1-n) + 1);
close all;
stem(n,x);
```

文件编辑后保存,然后单击“Run”图标运行“`ex1rectang.m`”,将产生如实验图 1-6 所示序列。



实验图 1-6 矩形序列



思考与练习

① 将例 1-3 程序中的 $N=10$ 改为 $N=15$, 观察现象。

② 将例 1-3 程序中的 $\text{sign}(N-1-n)$ 改为 $\text{sign}(N-n)$, 观察现象; 将程序中的 $\text{sign}(\text{sign}(N-1-n)+1)$ 改为 $\text{sign}(\text{sign}(N-1-n))$, 观察现象。

【例 1-4】产生实指数序列

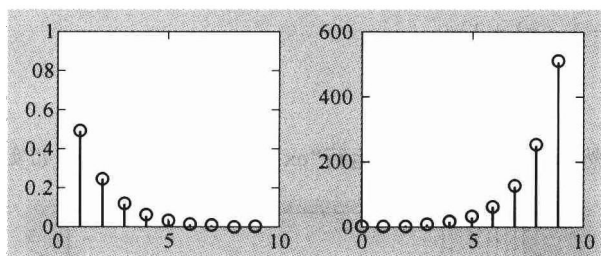
$$x(n) = a^n u(n) \quad 0 \leq n < \infty$$

在 MATLAB 中, 可采用运算符“.”实现实指数序列。按照前面所述的方法, 将下列指令编辑到“exlrealexp.m”文件中。

% exlrealexp.m 利用运算符“.”产生实指数序列

```
N = 10;
n = 0:N-1;
a = 0.5;
b = 2;
x = a.^n;
y = b.^n;
close all;
subplot(1,2,1);
stem(n,x);
subplot(1,2,2);
stem(n,y);
```

文件编辑后保存, 然后单击“Run”图标运行“exlrealexp.m”, 将产生如实验图 1-7 所示序列。



实验图 1-7 实指数序列

【例 1-5】产生正弦和余弦序列

$$x(n) = A \sin(\omega n) \quad -\infty \leq n < \infty, \quad y(n) = A \cos(\omega n) \quad -\infty \leq n < \infty$$

将下列指令编辑到“exlsincos.m”文件中。

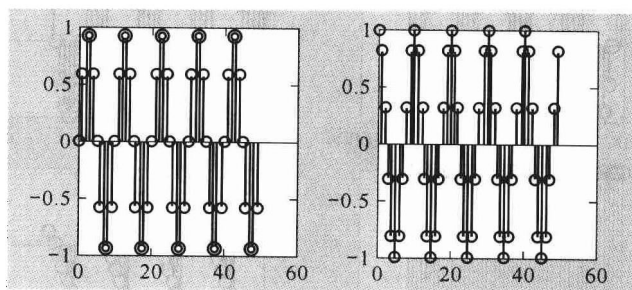
% exlsincos.m 产生正弦和余弦序列

```

N = 50;
A = 1;
f = 50;
fs = 500;
n = 0:N-1;
x = A * sin(2 * pi * f * n/fs);
y = A * cos(2 * pi * f * n/fs);
close all;
subplot(1,2,1);
stem(n,x);
subplot(1,2,2);
stem(n,y);

```

文件编辑后保存,然后单击“Run”图标运行“exlsincos.m”,将产生如实验图 1-8 所示序列。



实验图 1-8 正弦和余弦序列



思考与练习

分别修改例 1-5 程序中的信号频率 f 和采样频率 f_s 的值,观察图形变化。

【例 1-6】产生复指数序列

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

复指数序列也称为复正弦序列,由余弦序列作实部,正弦序列作虚部构成。在 MATLAB 中,函数 $\exp(x)$ 为指数函数, $\text{real}(x)$ 取 x 的实部, $\text{imag}(x)$ 取 x 的虚部, $\text{abs}(x)$ 求 x 的模值, $\text{angle}(x)$ 求 x 的幅角。将下列指令编辑到“exlexp.m”文件中。

```

% exlexp.m 产生复指数序列
N = 50;
n = 0:N-1;
x = exp(j * pi * n/6);
x_real = real(x);

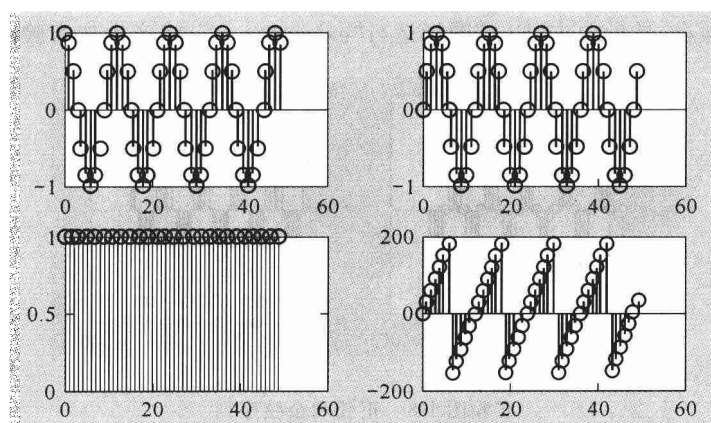
```

```

x_imag = imag(x);
x_magnitude = abs(x);
x_phase = angle(x) * 180/pi;
subplot(2,2,1);
stem(n,x_real);
subplot(2,2,2);
stem(n,x_imag);
subplot(2,2,3);
stem(n,x_magnitude);
subplot(2,2,4);
stem(n,x_phase);

```

文件编辑后保存,然后单击“Run”图标运行“exlexp.m”,将产生如实验图 1-9 所示序列。



实验图 1-9 复指数序列

【例 1-7】 显示给定的有限长序列。

除了上述标准序列,在信号处理中常常需要对给定的序列进行操作,将下列指令编辑到“exlgiven.m”文件中,其中函数 `fliplr(x)` 实现以数组“垂直中线”为对称轴,交换左右对称位置上的数组元素。

```

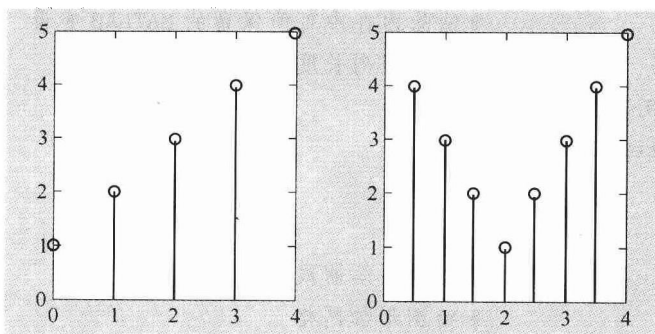
% exlgiven.m 产生给定序列并进行反折叠加操作
clear                % 清除内存中可能保留的 MATLAB 变量
n = 0:4;
x = [1,2,3,4,5];
y = fliplr(x);
k = -4:4;
z = [y,x(2:end)];
close all;
subplot(1,2,1);
stem(n,x);

```

```
subplot(1,2,2);
```

```
stem(k,z);
```

运行“exlgiven.m”,将产生如实验图 1-10 所示序列。



实验图 1-10 给定序列

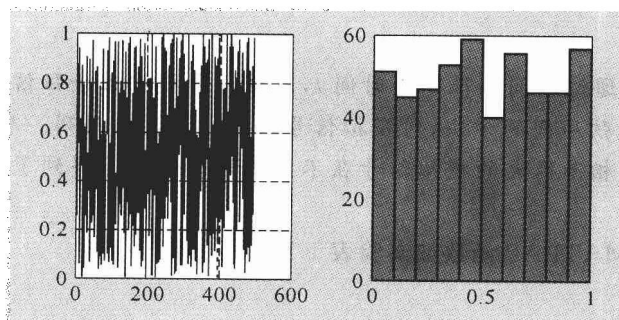
3. 常用信号的产生和显示

【例 1-8】 产生均匀分布的白噪声信号。

在 MATLAB 中,函数 `rand(1,N)` 产生均匀分布的随机数,利用它可以实现在有限区间上的白噪声信号。将下列指令编辑到“exlnoise.m”文件中。

```
% exlnoise.m 利用 rand(1,N) 产生均匀分布的白噪声信号
clear                % 清除内存中可能保留的 MATLAB 变量
N = 500;             % 定义序列长度是 500
x = rand(1,N);       % 调用 rand 产生均匀分布的伪随机数
close all;
subplot(1,2,1);      % 在一个图上分成左右两个子图
plot(x);             % 绘制连续曲线
grid on;             % 给图形加网格
subplot(1,2,2);      % 图上左右两个子图中的右边一个
hist(x);             % 作直方图检验其分布
grid on;
```

运行“exlnoise.m”,将产生如实验图 1-11 所示图形显示。



实验图 1-11 白噪声信号