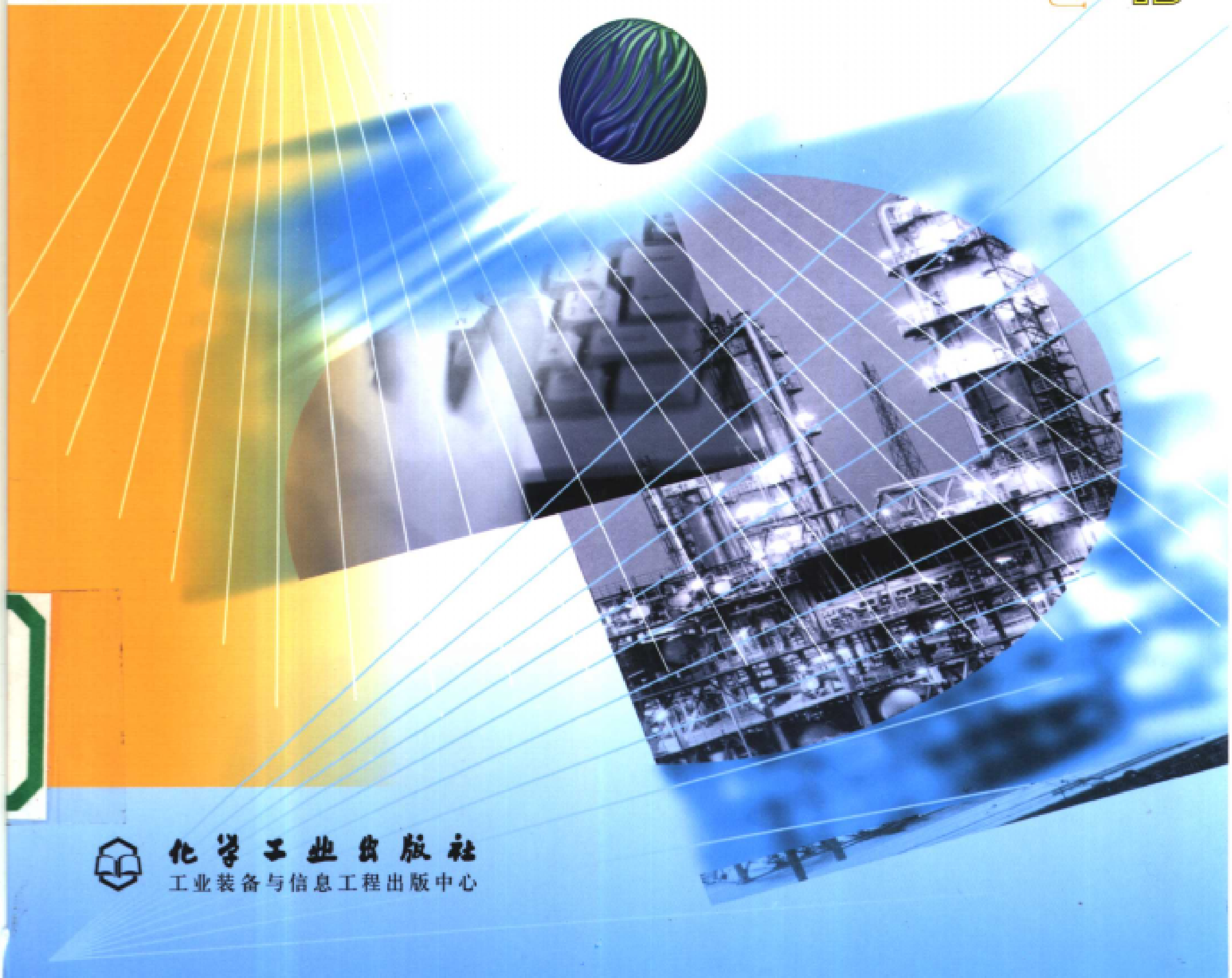
计算机工业应用技术丛书

JISUANJI GONGYE YINGYONG JISHU CONGSHU

数字信号处理及其MATLAB实现

赵红怡　张常年　编著



化学工业出版社
工业装备与信息工程出版中心

计算机工业应用技术丛书

数字信号处理及其MATLAB实现

赵红怡　张常年　编著

化学工业出版社
工业装备与信息工程出版中心
·北　京·

(京)新登字 039 号

图书在版编目(CIP)数据

数字信号处理及其 MATLAB 实现/赵红怡，张常年编著.
北京：化学工业出版社，2002.1
（计算机工业应用技术丛书）
ISBN 7-5025-3471-7

Ⅰ. 数… Ⅱ.①赵…②张… Ⅲ. 数字信号-信号-处理-软件包，MATLAB Ⅳ. TN911.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2001）第 069996 号

计算机工业应用技术丛书
数字信号处理及其 MATLAB 实现
赵红怡　张常年　编著
责任编辑：李玉晖
责任校对：陶燕华
封面设计：于　兵
*
化　学　工　业　出　版　社
工业装备与信息工程出版中心 出版发行
(北京市朝阳区惠新里 3 号　邮政编码 100029)
发行电话：(010) 64918013
http://www.cip.com.cn
*
新华书店北京发行所经销
北京云浩印刷厂印刷
三河市东柳装订厂装订
开本 787×1092 毫米 1/16　印张 15　字数 363 千字
2002 年 1 月第 1 版　2002 年 1 月北京第 1 次印刷
印　数：1－4000
ISBN 7-5025-3471-7/TP・293
定　价：29.00 元

计算机工业应用技术丛书
编写委员会

序

我国在“十五”期间和今后相当长的时期内将大力发展国民经济和推进社会信息化。这是覆盖现代化建设全局的战略举措．以信息化带动工业化，改造传统产业、发展以信息技术为代表的高新技术产业，从而推进国家现代化建设，已经成为全社会的共识．信息化给企业的经营、管理和发展带来了前所未有的冲击、挑战和机遇，信息化是必然趋势。

当前计算机应用朝着多领域发展，信息化技术涉及多方面的工作，主要包括计算机的广泛利用；企业内部网的建立并与外界实现网络互联；方便访问和利用的信息资源；生产过程控制方面的信息技术应用；计算机辅助设计用于设计新产品；企业生产、流通或服务信息系统有效运转并利用信息网络等手段与外界进行商务往来；建立企业综合管理信息系统等等．随着计算机新技术的不断出现，信息化的内容和工作也将不断扩展。凡是关心国家信息化建设、从事计算机应用开发工作的科技工作者和专业技术人员，都很有必要了解和掌握计算机技术的进步和计算机应用技术的发展。《计算机工业应用技术丛书》就是为以上目的编写的。

《计算机工业应用技术丛书》一套共八册，300 多万字，涉及了当今计算机应用技术的主要领域。其中，《计算机辅助设计与工程分析》和《计算机辅助制造》论述了 CAD/CAM 的主要技术方法并辅以大量的设计制造实例和经验；《工业企业决策支持系统》、《管理信息系统解决方案》和《数据库与工程应用》从不同的角度论述了信息处理技术在企业管理和办公自动化等领域的应用方法、设计技术和如何开发一个以数据库为中心的信息管理系统技术，介绍了多种理论和实用技术；《计算机通信与工业控制》则从企业自动化生产的角度讨论了计算机通信与控制技术的结合并通过先进的背景技术和丰富实例给予说明；《数字信号处理及其 MATLAB 实现》和《图像处理实用技术》则从另外的角度讨论了计算机信息处理技术的发展和变化，用全新的理论和方法研究和处理信息，使信息的表现更丰富多彩、更实用。

《计算机工业应用技术丛书》参考了国际上相关领域的专著和资料，也融会了作者们长期以来的研究成果和心得。对于从事计算机应用工作和关心计算机技术发展的读者，从这套书中可以得到很多启迪和对一些重要问题的解答。它的出版，对推动企事业单位信息技术的发展和应用会产生积极的影响。

《计算机工业应用技术丛书》立足于应用。在内容组织和编排上从理论到实践、由浅入深、图文并茂、通俗易懂．本套书中阐述的解决方案和开发工具是目前先进的和流行的。对于计算机应用技术人员以及从事计算机应用工作的其他专业的科技人员，它都是一套很有益的参考书。

中国科学院院士 赵鹏大

2001 年 6 月于北京

内　容　提　要

数字信号处理作为自动控制的重要环节在各个工业部门都有广泛的应用。计算机用于数字信号处理，由于其本身强大的数据处理能力，显示出比频谱分析仪等传统处理技术更加高效、灵活的特点。本书介绍了用科学计算语言 MATLAB 实现数字信号处理的方法和实践，所有程序均经作者调试运行过。全书内容包括数字信号处理基本理论及实现、数字滤波器设计与实现、一维信号处理的应用及实现、二维信号处理的应用及实现以及 MATLAB 语言中与数字信号处理有关内容的简单介绍。

本书语言简洁，内容精炼，可供应用数字信号处理的教学、科研、开发人员及相关专业学生参考。

目　录

第 1 章　数字信号处理基本理论及实现 …… 1
1.1　离散信号与系统 …… 1
1.1.1　离散信号的表示与运算 …… 2
1.1.2　离散系统的表示与实现 …… 5
1.2　离散时间傅里叶变换与 z 变换 …… 6
1.2.1　离散时间傅里叶变换(DTFT) …… 7
1.2.2　DTFT 的性质 …… 9
1.2.3　z 变换与 z 域的系统描述 …… 9
1.2.4　信号的采样与重构 …… 11
1.3　离散傅里叶变换 …… 13
1.3.1　离散傅里叶变换定义 …… 14
1.3.2　离散傅里叶变换性质 …… 17
1.3.3　用 DFT 分析系统 …… 21
1.3.4　快速傅里叶变换 …… 30
1.3.5　快速傅里叶变换应用实例 …… 32
1.3.6　离散余弦变换（DCT） …… 33
1.3.7　线性调频 z 变换（CZT） …… 35
第 2 章　数字滤波器设计及实现 …… 38
2.1　数字滤波器结构 …… 38
2.1.1　IIR 滤波器结构 …… 38
2.1.2　FIR 滤波器结构 …… 46
2.2　FIR 滤波器设计 …… 52
2.2.1　线性相位 FIR 滤波器的特征 …… 53
2.2.2　利用窗函数技术设计 …… 57
2.2.3　利用频率采样技术设计 …… 68
2.2.4　FIR 滤波器的应用实例 …… 81
2.3　IIR 滤波器设计 …… 83
2.3.1　模拟滤波器原型的特征 …… 84
2.3.2　模拟到数字滤波器的设计 …… 97
2.3.3　数字低通到数字滤波器的设计 …… 116
2.3.4　IIR 滤波器的应用实例 …… 122
2.3.5　IIR 滤波器和 FIR 滤波器的比较 …… 125
第 3 章　数字信号处理的应用及实现 …… 126
3.1　一维信号处理的应用 …… 126
3.1.1　数据的采集 …… 126

3.1.2 信号消噪处理 …… 129
3.1.3 信号特定频率的提取 …… 131
3.1.4 信号特定频率区间的抑制 …… 133
3.1.5 数字音频回响处理器的实现 …… 134
3.1.6 双音多频信号的检测与分析 …… 137
3.1.7 调制电路的软件实现 …… 144
3.1.8 数字变频技术的应用 …… 153
3.1.9 用 DSP 进行频谱监控 …… 157
3.2 二维信号处理的应用 …… 162
3.2.1 计算机数字图像 …… 162
3.2.2 图像的消噪处理 …… 170
3.2.3 图像对比度增强 …… 173
3.2.4 图像的边缘检测 …… 176
3.2.5 图像的压缩 …… 177
第 4 章 MATLAB 语言及其使用 …… 180
4.1 MATLAB 的使用 …… 180
4.1.1 MATLAB 命令窗口的进入与使用 …… 180
4.1.2 MATLAB 的文件编辑/调试器的进入与使用 …… 182
4.2 MATLAB 数值计算 …… 183
4.2.1 矩阵运算 …… 183
4.2.2 数组运算 …… 184
4.2.3 多项式运算 …… 185
4.3 MATLAB 符号计算 …… 187
4.3.1 符号运算的基本操作 …… 187
4.3.2 微分与积分运算 …… 189
4.3.3 求解方程和方程组 …… 190
4.3.4 积分变换 …… 191
4.4 MATLAB 绘图功能实例 …… 191
4.4.1 MATLAB 的图形窗口 …… 191
4.4.2 二维图形绘制 …… 192
4.4.3 三维图形 …… 197
4.4.4 特殊图形 …… 199
4.4.5 制作动画 …… 201
4.5 MATLAB 编程 …… 202
4.5.1 脚本与函数 …… 202
4.5.2 MATLAB 编程的基本知识 …… 205
4.6 MATLAB 的接口 …… 208
4.6.1 MATLAB 的数据接口 …… 208
4.6.2 文件 I/O 操作 …… 210
4.7 Simulink …… 212

4.7.1 Simulink 简介 …… 212
4.7.2 一个使用 Simulink 的例子 …… 213
4.7.3 Simulink 模块的操作 …… 217
4.8 Simulink 基本模块介绍 …… 219
4.8.1 输入源模块（Sources） …… 220
4.8.2 接收模块(Sinks) …… 220
4.8.3 连续系统模块(Continuous) …… 221
4.8.4 离散系统模块(Discrete) …… 221
4.8.5 信号与系统模块 (Signals & Systems) …… 222
4.8.6 数学运算模块(Math) …… 223

第 1 章　数字信号处理基本理论及实现

随着计算机和信息科学的飞速发展，信号处理逐渐发展成为一门独立的学科，成为信息科学的重要组成部分，在语音处理、雷达、图像处理、通信、生物医学工程等众多领域中得到广泛应用。

1.1　离散信号与系统

在数字信号处理中，所有信号都是离散时间信号——序列，表示为

$$x(n)=\{\cdots,x(-1),x(0),x(1),\cdots\}\qquad -\infty<n<\infty$$

如具体的离散时间信号 $x(n)=\{1,0.5,1,2.5,3,2,1,2,3\}$ $-2\leqslant n\leqslant 6$，用图形表示，如图 1-1 所示，只在 n 为整数时有意义。

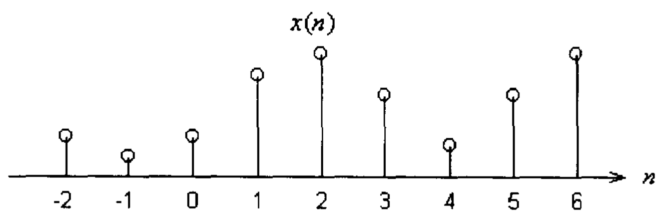


图 1-1　离散时间信号的表示

用 MATLAB 实现如下。

```
%s101.m
n=-2:6;
x=[1,0.5,1,2.5,3,2,0.8,2,3];
stem(n,x);
```

若要表示具有特定采样频率的信号，需定义时间轴向量。例如 $y(t)=\sin(2\pi f_1 t)+2\sin(2\pi f_2 t)$，当 f_1=50Hz, f_2=120Hz, f_s=1000Hz 时的信号为 $y(n)=\sin\left(\dfrac{100\pi}{1000}n\right)+2\sin\left(\dfrac{240\pi}{1000}n\right)$。$y(t)$，$y(n)$ 波形如图 1-2 所示。

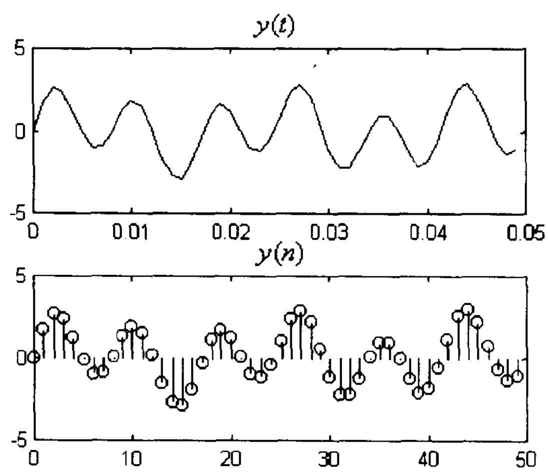


图 1-2　连续信号与离散信号的表示

用 MATLAB 实现如下。

```
%s102.m
f1=50;f2=120;fs=1000;
t=0:1/fs:1;n=t*fs;
y=sin(2*pi*f1*t)+2*sin(2*pi*f2*t);
subplot(211);plot(t(1:50),y(1:50));%画 y(t)的前 0.05s 的值
subplot(212);stem(n(1:50),y(1:50));%画 y(n)前 50 个样点值
```

1.1.1 离散信号的表示与运算

1.1.1.1 信号的表示

（1）典型信号的表示

① 单位脉冲序列 $\delta(n)=\begin{cases}1, & n=0\\0, & n\neq 0\end{cases}$

在 MATLAB 中，可用函数 zeros(1, N)产生一个由 N 个零组成的列向量，实现有限区间的 $\delta(n)$。如

x=zeros(1,N);

x(1)=1;

如要产生 $\delta(n-n_0)=\begin{cases}1, & n=n_0\\0, & n\neq n_0\end{cases}$，则可以采用 MATLAB 函数 impseq 实现如下。

```
function[x,n]=impseq(n0,n1,n2)
n=[n1:n2];x=[(n-n0)==0];
```

② 单位阶跃序列 $u(n)=\begin{cases}1, & n\geqslant 0\\0, & n<0\end{cases}$

可用函数 ones(1, N)产生一个由 N 个 1 组成的列向量，实现有限区间的 $u(n)$。如

n=0：N−1;

x=ones(1, N);

如要产生 $u(n-n_0)=\begin{cases}1, & n\geqslant n_0\\0, & n<n_0\end{cases}$，则可以采用 MATLAB 函数 stepseq 实现如下。

```
function[x,n]=stepseq(n0,n1,n2)
n=[n1:n2];x=[(n-n0)>=0];
```

③ 矩形序列 $R_N(n)=\begin{cases}1, & N-1\geqslant n\geqslant 0\\0, & \text{其他}\end{cases}$

④ 实指数序列 $x(n)=a^n u(n), a$ 为实数

采用 MATLAB 实现如下。

```
n=0:N-1;
x=a.^n;
```

⑤ 正弦序列 $x(n)=\sin(\omega n)$

采用 MATLAB 实现如下。

```
n=0:N-1;
x=sin(w*n);
```

⑥ 复指数序列 $x(n)=\mathrm{e}^{(\sigma+\mathrm{j}\omega n)}$

采用MATLAB 实现如下。

```
n=0:N-1;
x=exp((sigema+jw)*n);
```

⑦ 周期序列 $x(n)=x(n+N)$， $-\infty<n<\infty$

x_1 是 x 中的一个周期，要产生 3 个周期的 x 序列，采用 MATLAB 实现如下。

```
x=[x1 x1 x1];
```

（2）常用信号的表示

常用信号的 MATLAB 表示见表 1-1。

表 1-1 常用信号的 MATLAB 函数表示

信号名称	MATLAB 函数	说　明	信号名称	MATLAB 函数	说　明
三角波或锯齿波	sawtooth（t,width）	width=0.5，产生三角波 width=1，产生锯齿波	非周期三角波	tripuls(t,w,s)	w 为三角波宽度，s 为斜率
			非周期方波	rectpuls(t,w)	w 为方波宽度
方波	squre(t)		sinc 函数	sinc(t)	

用 MATLAB 实现常用信号的程序举例如下。

```
%s103.m
t=0:0.0001:0.2;
x=sawtooth(2*pi*50*t,1);%锯齿波
subplot(321);plot(t,x);
x=sawtooth(2*pi*50*t,0.5);%三角波
subplot(322);plot(t,x);
x=square(2*pi*50*t);%方波
subplot(323);plot(t,x);axis([0,0.2,-1.5,1.5]);
x=tripuls(t,0.1);%非周期三角波
subplot(324);plot(t,x);axis([0,0.2,-0.1,1.1]);
x=rectpuls(t,0.1);%非周期方波
subplot(325);plot(t,x);axis([0,0.2,-0.1,1.1]);
t=-5:0.1:5;x=sinc(t);
subplot(326);plot(t,x);axis([-5,5,-0.4,1.1]);
```

结果如图 1-3 所示。

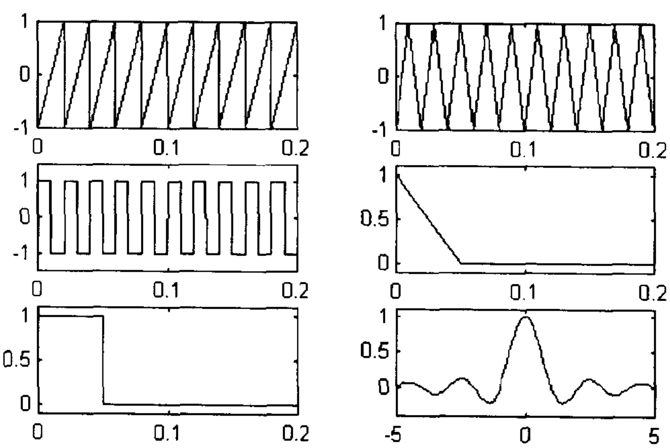


图 1-3 常用信号的表示

1.1.1.2 信号的运算

（1）信号加

$$x(n) = x_1(n) + x_2(n)$$

MATLAB 实现：x=x1+x2

（2）信号乘

$$x(n)=x_1(n)x_2(n)$$

MATLAB 实现：x=x1.*x2

（3）幅度变化

$$y(n)=ax(n)$$

MATLAB 实现：y=a*x

（4）移位

$$y(n)=x(n-m)$$

MATLAB 实现：y=[zeros(1,m) x]

（5）折叠

$$y(n)=x(-n)$$

MATLAB 实现：y=fliplr(x)

（6）采样和

$$y(n)=\sum x(n)$$

MATLAB 实现：y=sum(x(n1:n2))

（7）采样积

$$y(n)=\prod x(n)$$

MATLAB 实现：y=prod(x(n1:n2))

（8）信号能量

$$E_x=\sum_{n=-\infty}^{\infty}|x(n)|^2$$

MATLAB 实现：Ex=sum(abs(x).^2)

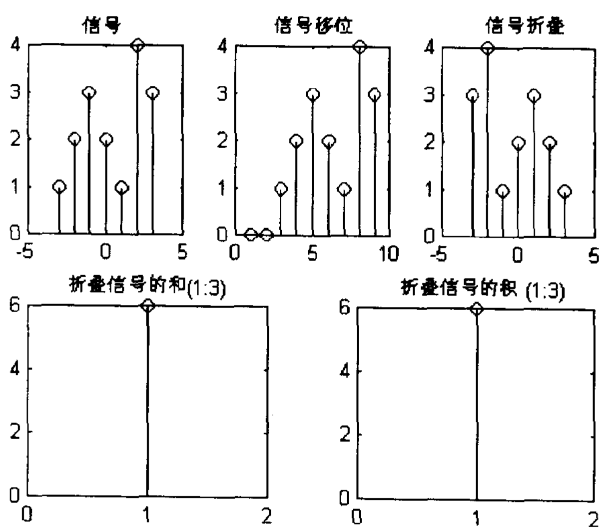


图 1-4 信号运算

用 MATLAB 实现信号基本运算的程序举例如下。

```
%s104.m
n=-3:3;x=[1,2,3,2,1,4,3]; N=length(x);
m=2;n1=1;n2=3;subplot(231);stem(n,x);%表示信号
y=[zeros(1,m) x];subplot(232);stem(y);%信号移位
```

```
y=fliplr(x);subplot(233);stem(n,y);%信号折叠
y=sum(x(n1:n2));subplot(223);stem(y);%信号和
y=prod(x(n1:n2));subplot(224);stem(y);%信号积
Ex=sum(abs(x).^2) %信号能量
Px=sum(abs(x).^2)/N
```

运行结果如图 1-4 所示。

1.1.2 离散系统的表示与实现

一个离散时间系统，输入信号为 $x(n)$，输出信号为 $y(n)$。运算关系用 $T[\ ]$表示，则输出与输入的关系可以表示为 $y(n)=T[x(n)]$。

（1）线性时不变系统（LTI）的表示

线性时不变系统的输入输出关系可通过单位脉冲响应 $h(n)$表示为

$$y(n)=x(n)*h(n)=\sum_{m=-\infty}^{\infty}x(m)h(n-m)$$

式中*表示卷积运算。

（2）线性时不变系统的实现

可物理实现的线性时不变系统是稳定的、因果的。这种系统的单位脉冲响应是因果的（单边）且绝对可和的，即

$$h(n)=0,\quad n<0$$

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty}h(n)<\infty$$

在 MATLAB 中采用函数 conv 实现卷积运算，即

y=conv(x,h);

它默认序列从 n=0 开始。

［例 1］ 设某 LTI 的单位脉冲响应 $h(n)=0.8^n u(n)$

（1）判断此系统是否可实现；

（2）当输入为矩形脉冲 $x(n)=u(n)-u(n-10)$ 时，求此 LTI 的输出 $y(n)$；

（3）用 MATLAB 实现，并画出图形。

解：（1）$n<0$ 时 $h(n)$=0，故系统是因果的系统

$\sum_{n=-\infty}^{\infty}h(n)=\sum_{n=0}^{\infty}0.8^n=\frac{1}{1-0.8}=5<\infty$，故系统是稳定的系统，所以此系统是可实现的。

（2）$y(n)=x(n)*h(n)$

① $n<0$ 时，$h(n-m)$=0，0≤m≤9

故 $y(n)=0$

② 0≤n≤9 时，$h(n-m)$=1，0≤m≤n

故 $y(n)=\sum_{m=0}^{n}1\times0.8^{(n-m)}=0.8^n\frac{1-0.8^{-(n+1)}}{1-0.8^{-1}}=5[1-0.8^{(n+1)}]$

③ n≥9 时，$h(n-m)$=1，0≤m≤9

故 $y(n)=\sum_{m=0}^{9}1\times0.8^{(n-m)}=0.8^n\frac{1-0.8^{-10}}{1-0.8^{-1}}=5\times(1-0.8^{10})\times0.8^{(n-9)}$

（3）实现程序如下。

```
%s105.m
x=[ones(1,10)];
x1=[ones(1,10),zeros(1,40)];
N1=length(x);
n1=0:N1-1;
N2=50;n2=0:N2-1;
h=0.8.^n2;
y=conv(x,h);
N=N1+N2-1;n=0:N-1;
subplot(311);stem(n2,x1);
subplot(312);stem(n2,h);
subplot(313);stem(n,y);
```

结果如图 1-5 所示。

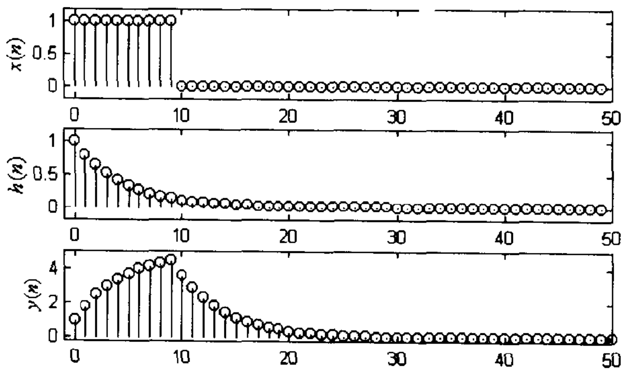


图 1-5 LTI 系统的输入输出

由图 1-5 可见，输入脉冲经过系统后发生了畸变。

如果 $x(n)$、$h(n)$的起点不为 0，则可采用 conv_m 计算卷积。

```
function[y,ny]=conv_m(x,nx,h,nh)
%改进卷积程序
nyb=nx(1)+nh(1);
bye=nx(length(x))+nh(length(h));
ny=[nyb,nye];
y=conv(x,h);
```

[例 2] $x(n)=[3,11,7,0,-1,4,2]$，$-3\leqslant n\leqslant 3$；$h(n)=[2,3,0,-5,2,1]$，$-1\leqslant n\leqslant 4$，计算卷积 $y(n)=x(n)*h(n)$。

解：MATLAB 程序实现如下。

```
%s106.m
x=[3,11,7,0,-1,4,2];nx=[-3:3];
h=[2,3,0,-5,2,1];nh=[-1:4];
[y,ny]=conv_m(x,nx,h,nh)
```

运行结果 $y(n)=[6,31,47,6,-51,-5,41,18,-22,-3,8,2]$，$-4\leqslant n\leqslant 7$

1.2 离散时间傅里叶变换与 z 变换

线性时不变系统可以通过线性卷积计算该系统对任意输入的响应，而卷积的含义是，任

何信号可以用单位样本的倍乘和延时的线性组合来表示。把信号表示成为基于复指数信号集$\{e^{j\omega n}\}$的组合，称为离散时间傅里叶变换(DTFT)。在模拟信号和系统中，离散时间傅里叶变换是重要的分析工具。

1.2.1 离散时间傅里叶变换(DTFT)

设序列$x(n)$绝对可和，即$\sum_{n=-\infty}^{\infty}|x(n)|<\infty$，则$x(n)$的离散时间傅里叶变换(DTFT)为

$$X(e^{j\omega})=\sum_{n=-\infty}^{\infty}x(n)e^{-j\omega n} \tag{1-1}$$

$X(e^{j\omega})$的离散时间傅里叶逆变换（IDTFT）为

$$x(n)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi}X(e^{j\omega})e^{j\omega n}d\omega \tag{1-2}$$

其中ω是数字频率，单位是 rad（弧度）。

DTFT 的两个重要特性如下。

① 周期性　$X(e^{j\omega})$为连续周期函数，周期为2π，即

$$X(e^{j\omega})=\sum_{n=-\infty}^{\infty}x(n)e^{-j(\omega+2\pi)n}=X(e^{j(\omega+2\pi)})$$

所以分析序列$x(n)$时，只需要得到一个周期的$X(e^{j\omega})$（一般$\omega\in[0,2\pi]$，或者$[-\pi,\pi]$），而不需要研究整个范围$-\infty<\omega<+\infty$。

② 对称性　对于实值的$x(n)$，$X(e^{j\omega})$是共轭对称的，即

$$X(e^{-j\omega})=X^*(e^{j\omega})$$

或者表示成

$$\mathrm{Re}[X(e^{-j\omega})]=\mathrm{Re}[X(e^{j\omega})] \qquad \text{（偶对称）}$$

$$\mathrm{Im}[X(e^{-j\omega})]=-\mathrm{Im}[X(e^{j\omega})] \qquad \text{（奇对称）}$$

$$|X(e^{-j\omega})|=|X(e^{j\omega})| \qquad \text{（偶对称）}$$

$$\angle X(e^{-j\omega})=-\angle X(e^{j\omega}) \qquad \text{（奇对称）}$$

所以要画出$X(e^{j\omega})$，只需$X(e^{j\omega})$的半个周期。

[例 1]　研究序列$x(n)=0.8^n u(n)$的离散时间傅里叶变换。

解：$x(n)$是绝对可和的，因此它的离散时间傅里叶变换存在

$$X(e^{j\omega})=\sum_{n=-\infty}^{\infty}x(n)e^{-j\omega n}=\frac{e^{j\omega}}{e^{j\omega}-0.8}$$

MATLAB 程序实现如下。

```
%s107.m
%[0,2pi]区间分为 501 点
n=0:50;x=(0.8).^n;%输入序列 x(n)=0.8^n u(n)
subplot(221);stem(n,x); title('输入序列');
w=[0:1:500]*2*pi/500;
X=exp(j*w)./(exp(j*w)-0.8*ones(1,501));%离散时间傅里叶变换
```

```
magX=abs(X);angX=angle(X);
subplot(223);plot(w/pi,magX);
xlabel('以pi 为单位的频率');title('离散时间傅里叶变换幅度');
subplot(224);plot(w/pi,angX);
xlabel('以pi 为单位的频率');title('离散时间傅里叶变换相位');
```

结果如图 1-6 所示。

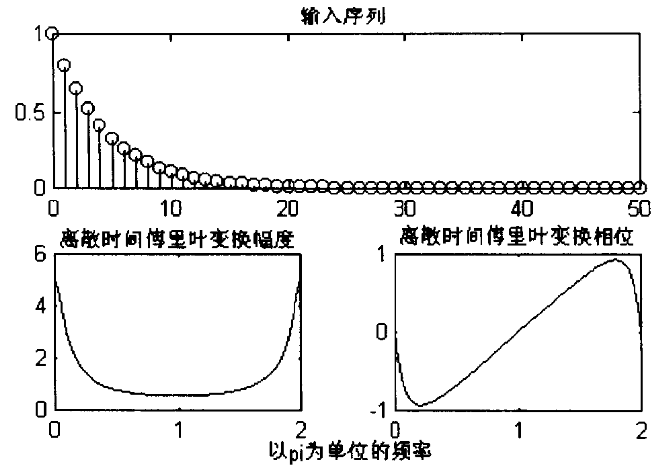


图 1-6 离散时间傅里叶变换例 1

[例 2] 设 $x(n)=R_N(n)$，求 $x(n)$离散时间傅里叶变换。

解:

$$X(\mathrm{e}^{\mathrm{j}\omega})=\sum_{n=-\infty}^{\infty}R_N(n)\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\omega n}=\frac{\sin\left(\dfrac{\omega N}{2}\right)}{\sin\left(\dfrac{\omega}{2}\right)}\mathrm{e}^{-\mathrm{j}(N-1)\frac{\omega}{2}}$$

设 $N=7$，其幅度和相位随频率变化曲线如图 1-7 所示。

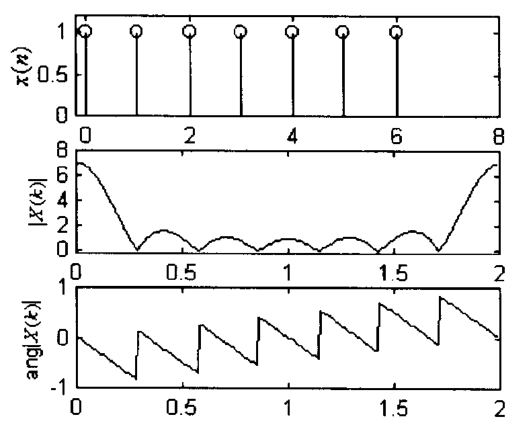


图 1-7 离散时间傅里叶变换例 2

MATLAB 程序实现如下

```
%s108.m
N=7;n=0:N-1;x=[ones(1,N)];
k=0:199;w=(pi/100)*k;%[0, 2pi]轴分为 200 点
X=x*(exp(-j*pi/100)).^(n'*k);%用矩阵向量乘法求 DTFT
```