

高等学校教材

电路与系统分析

——使用 MATLAB

赵录怀 杨育霞 张 震

高等教育出版社

内容简介

本书介绍使用 MATLAB 进行电路、信号与系统的分析,主要内容有三篇:学用 MATLAB 电路分析、信号与系统分析。第一篇为 MATLAB 语言的基础知识,介绍 MATLAB 数值计算、程序设计、符号运算及图形绘制方面的功能和指令。第二篇为 MATLAB 在电路分析中的应用,按电路分析的三大基本内容分章:电阻电路、动态电路的时域分析、频域分析。本篇除介绍使用 MATLAB 进行电路分析的基本方法外,还给出了作者自编的通用符号电路分析程序 sana.m,它使线性电路的分析问题变得十分简单。第三篇主要配合高等教育出版社出版、赵录怀等编的《信号与系统分析》教材编写,共七章:信号的可视化、LTI 系统的时域数值分析、拉普拉斯变换、z 变换、连续时间信号与系统的傅里叶分析、离散时间信号与系统的傅里叶分析、模拟与数字滤波器。书后还给出了一个例题索引。

本书紧扣“电路”、“信号与系统”课程的内容,逐一介绍有关函数,其内容易懂、易学、易掌握。

本书可作为“电路”、“信号与系统”课程的辅助教材使用,也可供有关教师在教学、制作电子教案时参考。

图书在版编目(CIP)数据

电路与系统分析——使用 MATLAB 赵录怀,杨育霞,张震. —北京:高等教育出版社,2004.7

ISBN 7 - 04 - 014537 - 5

.电... . 赵... 杨... 张... . 电路
分析 - 计算机辅助计算 - 软件包, MATLAB 信号系统 -
系统分析 - 计算机辅助计算 - 软件包, MATLAB
. TM133 - 33 TN911.6 - 33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004)第 047474 号

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010 - 64054588
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	http://www.hep.edu.cn
总 机	010 - 82028899		http://www.hep.com.cn

经 销 新华书店北京发行所
印 刷

开 本	787 × 960 1/16	版 次	年 月第 1 版
印 张	20.25	印 次	年 月第 次印刷
字 数	360 000	定 价	23.40 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

策划编辑 刘激扬
责任编辑 曲文利
封面设计 李卫青
责任绘图 郝 林
版式设计 范晓红
责任校对 杨凤玲
责任印制

前言

MATLAB 是英文 MATrix LABoratory 的缩写,意为矩阵实验室,其产生的最初目的是为了使得计算机上的矩阵运算更加便利。MATLAB 采用的计算表达式几乎与其数学表达式相同,它把看起来相当繁琐复杂的矩阵运算和复数运算变得简单得令人难以置信,而且还能十分容易地绘制各种精美的图形。当今, MATLAB 软件在工业中的应用越来越广泛,已成为必不可少的科研和教学工具。

目前,国内已出版了不少有关 MATLAB 的书籍,而结合某一课程学习的并不多见。“电路”和“信号与系统”是电类本科生重要的专业基础课,而电路、信号与系统的分析问题最终可归结为有关数学模型的求解,其内容涉及代数方程、微分方程、复数运算、矩阵运算、傅里叶变换、拉普拉斯变换、z 变换等的数值计算和符号计算问题,而且需要大量的时域和频域的绘图工作。学生在学习这两门课程时曾抱怨把相当多的精力用在了数学计算上。在国外新近出版的一些“电路”和“信号与系统”教材中,将 MATLAB 作为一种解题的辅助工具,这无疑对学生学习这两门课程是非常有益的。

编写本书的指导思想是把本书作为“电路”和“信号与系统”这两门课程的辅助教材,学生可以结合本书提供的 MATLAB 方法求解习题,绘制曲线,把繁琐的数学计算变成轻松愉快的事情。不仅如此,学生如果能够恰当地运用 MATLAB 对一些疑点和难点问题进行分析,则有助于理清解题的思路和方法,巩固基本概念。此外,学生通过 MATLAB 的入门学习,还可掌握一种实用的工程分析工具,为今后在毕业设计和科学研究中用 MATLAB 编写自己的计算机程序打下一个良好的基础。

本书分为三篇：

第一篇学用 MATLAB 简明扼要地介绍了 MATLAB 的基本功能,共有五章: MATLAB 简介、MATLAB 的数值计算、MATLAB 程序设计、MATLAB 的符号运算、MATLAB 的可视化功能。为了配合“电路”和“信号与系统”课程,本篇对与课程有关的常用函数、程序设计和可视化图形等内容作了比较详细地说明和举例。

第二篇电路分析,按“电路”课程的三大基本内容分为三章:电阻电路、动态电路的时域分析、频域分析。本篇内容除介绍使用 MATLAB 进行电路分析的基本方法外,还简要介绍了电路的一些计算方法,并提供了一个作者自编的符号线性电路分析程序 `sana.m`,该程序具有极其简单的输入数据格式,几乎可以求解本科“电路”课程教材中线性电路部分的所有题目。使用该程序,学生不会困惑于数值和方程的求解,从而有更多的精力关注基本概念和分析方法。对在“电路”课程中学习拉普拉斯变换内容的读者,可参看第三篇第十一章。本篇内容可配合任一“电路”课程教材使用。

第三篇信号与系统分析,按高等教育出版社出版、赵录怀等编的《信号与系统分析》教材分章。第九章介绍用 MATLAB 实现信号的可视化,第十章介绍 LTI 系统的时域数值分析,第十一章为拉普拉斯变换,第十二章为 z 变换,第十三章为连续时间信号与系统的傅里叶分析,第十四章为离散时间信号与系统的傅里叶分析,第十五章介绍模拟与数字滤波器的设计。本篇用 MATLAB 作为信号分析的工具,紧扣相关内容,逐一列出函数和举例。

本书由赵录怀负责修改和定稿,并编写第二篇及第三篇的十、十一、十二章,杨育霞编写第一篇及第三篇的第九章,张震编写第三篇的十三、十四、十五章。

清华大学应启珩教授审阅了书稿,提出了非常宝贵的修改意见,作者对他在信号与系统及其仿真方面的造诣深表佩服,在此表示由衷的感谢。

限于作者水平,书中难免有不妥甚至错误之处,恳请读者批评指正。

赵录怀 杨育霞 张震
2004年元旦

目录

第一篇 学用 MATLAB

第一章	MATLAB 简介	3
1.1	MATLAB特点.....	3
1.2	MATLAB 6.x的集成环境	4
1.3	MATLAB管理指令	9
1.4	MATLAB帮助系统	10
第二章	MATLAB 的数值计算	13
2.1	MATLAB的变量与表达式	13
2.2	矩阵的创建与保存	19
2.3	MATLAB常用的矩阵运算函数	24
2.4	关系运算与逻辑运算	29
2.5	多项式及其运算	32
第三章	MATLAB 程序设计	36
3.1	M 文件	36
3.2	程序流程控制	39
第四章	MATLAB 的符号运算	47
4.1	符号表达式和符号矩阵的创建	47
4.2	符号表达式和符号矩阵的运算	50

4.3 符号表达式的化简和展开	55
4.4 方程求解	57
第五章 MATLAB的可视化功能	60
5.1 二维图形的绘制	60
5.2 二维图形的修饰	67
5.3 三维图形的绘制	77

第二篇 电路分析

第六章 电阻电路	85
6.1 电阻电路的方程及求解	85
6.2 建立结点方程的计算机方法	90
6.3 符号电路分析程序 sana	97
6.4 电阻电路分析举例	102
第七章 动态电路的时域分析	110
7.1 一阶电路	111
7.2 时域符号分析的一般方法	116
7.3 初值常微分方程问题的数值求解	119
7.4 微分方程计算函数的属性设置	126
7.5 离散时间电路模型	130
第八章 频域分析	139
8.1 相量方程及其求解	139
8.2 电路的正弦分析	146
8.3 频率响应	151
8.4 频域符号分析	157

第三篇 信号与系统分析

第九章 信号的可视化	167
9.1 连续时间信号的可视化	167
9.2 离散时间信号的可视化	175
9.3 连续时间信号的自变量变换及运算	177
9.4 离散时间信号的自变量变换及运算	181
第十章 LTI系统的时域数值分析	186
10.1 连续时间系统的时域分析	186

目 录

10.2	离散时间系统的时域分析	190
10.3	卷积求和	194
10.4	数值卷积	197
10.5	系统的状态空间分析	198
第十一章	拉普拉斯变换	204
11.1	拉普拉斯变换	204
11.2	系统模型	211
11.3	系统函数的极零点图	215
11.4	频率响应	218
11.5	系统的互联	222
11.6	复频域电路分析	224
第十二章	z 变换	231
12.1	z 变换.....	231
12.2	差分方程的 z 变换求解	240
12.3	系统模型	242
12.4	频率响应	247
第十三章	连续时间信号与系统的傅里叶分析	250
13.1	傅里叶级数	250
13.2	傅里叶变换	255
13.3	傅里叶变换的性质	257
13.4	连续时间系统的频域分析	263
13.5	傅里叶变换与拉普拉斯变换的关系	267
第十四章	离散时间信号与系统的傅里叶分析	270
14.1	离散傅里叶变换	270
14.2	离散傅里叶变换的快速算法	272
14.3	离散傅里叶变换在信号频谱分析中的应用	273
14.4	DFT在卷积计算中的应用	280
第十五章	模拟与数字滤波器	284
15.1	模拟低通滤波器的设计	285
15.2	模拟滤波器的频率变换	290
15.3	滤波器的最小阶次估计	294
15.4	IIR滤波器的设计.....	296
15.5	MATLAB标准滤波器的设计	299
15.6	FIR滤波器的设计	301
附录	例题索引	309
参考书目	314

第九章 信号的可视化

信号通常用数学函数表示,一维信号按照自变量的取值是否连续分为连续时间信号和离散时间信号,分别用 $x(t)$ 和 $x[n]$ 表示。为了观察信号随时间变化的总体状况,信号常常用图形表示。MATLAB强大的图形处理功能及符号运算功能为实现信号的可视化提供了强有力的工具。本章首先介绍用MATLAB实现连续时间信号和离散时间信号可视化的方法,然后介绍信号的自变量变换。

9.1 连续时间信号的可视化

严格说来,只有用符号解析式才能表示连续时间信号,而数值方法只是连续时间信号各个样点的数据,只有当样点取得非常密时才可近似看成连续时间信号。MATLAB在绘制连续时间信号的曲线时,用直线连接相邻的两个样点,当取样间隔足够小时,这些离散的样点就能较好的表示连续时间信号。在MATLAB中连续时间信号可用数值和符号两种方式表示。

用数值方式表示连续时间信号 $x(t)$,需要两个行向量 t 和 x 来分别代表给定的时间和信号的取值。定义时间取值的语句如下:

$$t = t_1 : p : t_2$$

其中, t_1 为信号的起始时间; t_2 为终止时间; p 为时间间隔。若用 x 表示向量 t 所定义时间点上的函数值,利用 t 和 x 两个行向量,就可以利用MATLAB的绘图指令来绘出该信号的时域波形。

信号与系统中大多数信号都可以直接在MATLAB的函数库调用,详见第二章中表2-7的基本函数。对一些MATLAB函数库中没有定义的函数,例如阶跃函数,读者需要自己创建函数文件。

例 9-1 连续时间信号的波形

绘出符号函数 $\text{sgn}(t) = \begin{cases} -1 & (t < 0) \\ 1 & (t > 0) \end{cases}$ 、sinc函数 $\text{sinc}(t) = \frac{\sin(t)}{t}$ 、指

数函数 $e^{-1.5t}$ 和对数函数 $\ln t$ 的波形。

解 这几个函数都是 MATLAB的函数库存在的函数,相应的语句为

符号函数 $x1 = \text{sign}(t)$

sinc函数 $x2 = \text{sinc}(t)$

指数函数 $x3 = \text{exp}(-1.5t)$

对数函数 $x4 = \text{log}(t)$

M文件如下:

```
t= -10 0.11 10; % 定义信号 x1 和 x2的时间范围向量
x1 = sign(t); % 计算符号函数 x1
subplot(2,2,1);stairs(t,x1); % 绘制符号函数波形
axis([-10,10, -1.1,1.1]); % 确定坐标系
x2 = sinc(t); % 计算 sinc函数 x2
subplot(2,2,2);pbt(t,x2) % 绘制 sinc函数波形
t=0 0.02 5; x3 = exp(-1.5* t); % 计算指数函数 x3
subplot(2,2,3);pbt(t,x3); % 绘制指数函数波形
t=0.01 0.02 5;x4 = log(t); % 计算对数函数 x4
subplot(2,2,4);pbt(t,x4) % 绘制对数函数波形
```

波形如图 9 - 1所示。

例 9 - 2 单位阶跃函数的波形

绘出单位阶跃函数 $\vartheta(t)$ 的波形和函数 $x(t) = \vartheta(t) + \vartheta(t - 1) - 2\vartheta(t - 2)$ 的波形。

解 单位阶跃函数 $\vartheta(t)$ 在 MATLAB函数库中不存在,需要用语句来实现。下面给出几种最简单的方法。

方法 1:利用阶跃函数与符号函数的关系 $\vartheta(t) = 0.5 + 0.5 \text{sgn}(t)$ 间接实现。

```
t= -1 0.001 2;x = 1/2 + 0.5* sign(t);
```

```
stairs(t,x);axis([-1,2, -0.1,1.2])
```

方法 2:利用关系运算符实现。

MATLAB中定义 $\text{sinc}(t) = \frac{\sin(t)}{t}$,而不是 $\text{sinc}(t) = \frac{\sin(t)}{t}$ 。

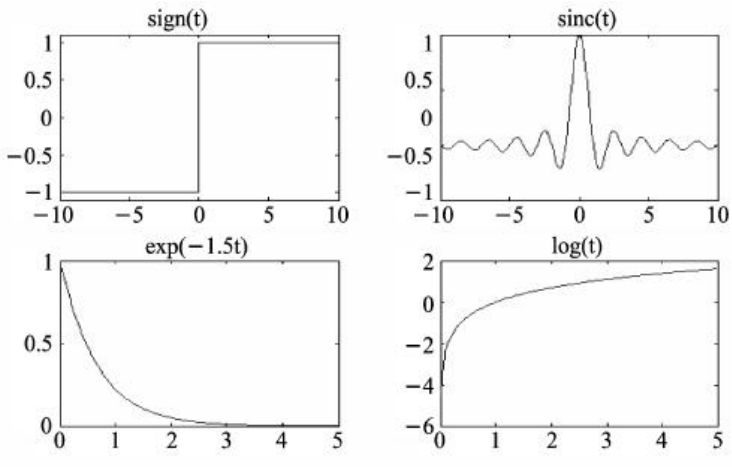


图 9-1 例 9-1 的波形

`t = -1:0.001:2; x = (t > 0); stairs(t, x); axis([-1, 2, -0.1, 1.2])`
 方法 3: 建立一个函数文件 (Heaviside.m), 使用时可直接调用。

```
t = -1:0.001:2; x = Heaviside(t); stairs(t, x); axis([-1, 2, -0.1, 1.2])
function x = Heaviside(t)
% unit step function
x = (t > 0);
% end of function Heaviside
```

以上三种方法的结果相同, 所绘出的波形均为图 9-2。

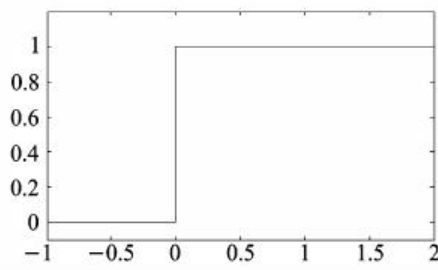
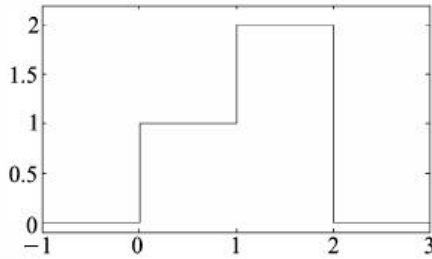


图 9-2 单位阶跃函数

函数 $x(t) = \square(t) + \square(t-1) - 2\square(t-2)$ 可以利用方法 2 来实现。

```
t = -1:0.005:3; x = (t > 0) + (t > 1) - 2*(t > 2);
stairs(t, x); axis([-1, 3, -0.1, 2.2])
```

绘出的波形为图 9-3 所示。

图 9-3 $x(t) = \square(t) + \square(t-1) - 2\square(t-2)$

例 9-3 冲激函数的逼近

单位冲激函数 $\delta(t)$ 由于在 $t=0$ 处的值为无限大, 用图形表示有一定困难, 但一些函数在某一参数的极限时表现为冲激函数。下列三个函数在 $\Delta \rightarrow 0$ 时均为单位冲激函数, 试绘出 Δ 取 1、2、3 时的波形。(1) 宽度为 Δ , 高度为 $\frac{1}{\Delta}$ 的矩形脉冲; (2) 函数 $\frac{\sin(\Delta t)}{t}$; (3) 函数 $\frac{\Delta}{(\Delta^2 + t^2)}$ 。

解 (1) M 文件如下:

```
t = -1 0.001 1;
for i = 1:3
    dt = 1/(i^4);
    x = (1/dt) * ((t >= -(1/2*dt)) - (t >= (1/2*dt)));
    subplot(1,3,i); stairs(t,x);
end
```

end

波形如图 9-4 所示。

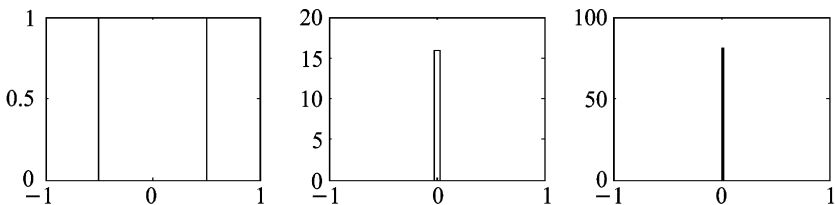


图 9-4 矩形脉冲逼近冲激函数的过程

(2) M 文件如下:

```
t = -10 0.011 10;
```

```

for i=1:3
    dt=1/(i^4);
    x=sin(pi*t/dt)./(pi*t);
    subplot(1,3,i);plot(t,x);
end

```

波形如图 9 - 5 所示。

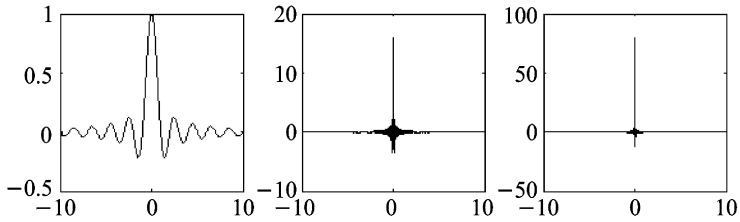


图 9 - 5 函数 $\frac{\sin(\pi t)}{t}$ 逼近冲激函数的过程

(3) M 文件如下：

```

t= -10 0.01 10;
for i=1:3
    dt=1/(i^4);
    x=dt./(pi*(dt^2+t.^2));
    subplot(1,3,i);plot(t,x);
end

```

波形如图 9 - 6 所示。

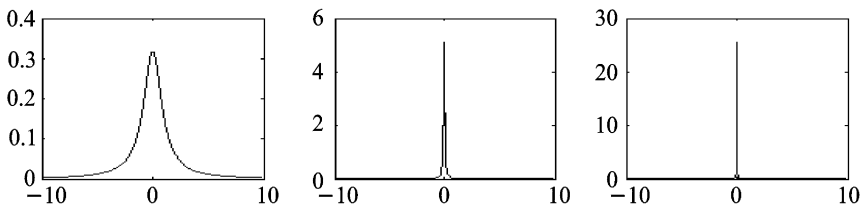


图 9 - 6 函数 $\frac{dt}{(\pi^2 + t^2)}$ 逼近冲激函数的过程

例 9 - 4 正弦信号的波形

在 $-10 < t < 10$ 的时间范围内绘出 $x_1(t) = \sin(t + \frac{\pi}{3})$ 和 $x_2(t) = 0.5\cos(2t)$ 的波形。

解 M文件如下：

```
t = -10:0.01:10; x1 = sin(t + pi/3);
x2 = 0.5 * cos(2 * t);
subplot(1,2,1); plot(t,x1); axis([-10,10,-1.1,1.2]);
subplot(1,2,2); plot(t,x2); axis([-10,10,-0.6,0.6]);
```

波形如图 9-7 所示。

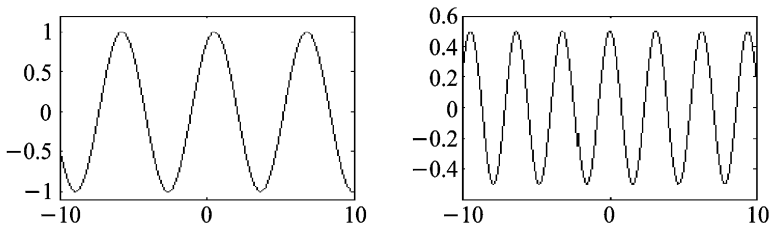


图 9-7 正弦余弦函数波形

周期矩形波函数的调用格式如下：

```
square(t)
square(t,duty)
```

该函数与 $\sin(t)$ 类似, 周期为 2, 振幅为 1 (最大、最小值分别为 1 和 -1), t 为时间行向量。duty 为占空比的百分数, 即函数值为正的区域在一个周期内所占的百分数, 如果缺省, 其值为 50, 即在一个周期内函数值为正的持续时间等于函数值为负的持续时间。在 $(0, 2 \times \text{duty}/100)$ 区间函数值等于 1, 在 $(2 - \text{duty}/100, 2)$ 区间函数值等于 -1。

例如, 以下语句的输出波形如图 9-8 所示。

```
t = -10:0.01:10; x1 = square(t); x2 = 0.5 * (square(t,20) + 1);
subplot(1,2,1); stairs(t,x1); axis([-10,10,-1.1,1.2]);
subplot(1,2,2); stairs(t,x2); axis([-10,10,-0.1,1.2]);
```

周期锯齿波函数的调用格式如下：

```
sawtooth(t)
sawtooth(t,width)
```

其中, 锯齿波的周期为 2, 振幅为 1, t 为时间行向量, width 指定最大值出现的

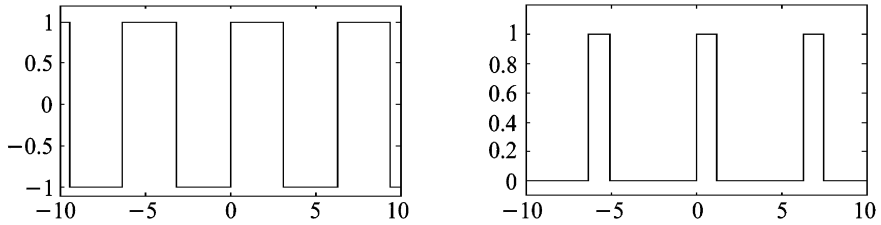


图 9 - 8 矩形波信号

位置,在 0 到 1 之间取值。当 t 由 0 增大到 $\text{width} * 2$ 时,函数值由 -1 增大到 1,当 t 由 $\text{width} * 2$ 增大到 2 时,函数值由 1 减小到 -1。例如:

```
t = -10:0.01:10; x1 = sawtooth(t); x2 = 0.5 * (sawtooth(t,0.5) + 1);
subplot(1,2,1); plot(t,x1); axis([-10,10,-1.1,1.2])
subplot(1,2,2); plot(t,x2); axis([-10,10,-0.1,1.2])
```

其波形如图 9 - 9 所示。

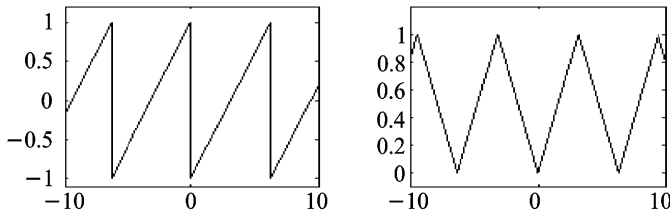


图 9 - 9 锯齿波和三角波

如果信号可以用一个符号表达式来表示它,就可以用 MATLAB 提供的 `ezplot` 指令绘制出信号的波形,注意符号法需要定义有关符号变量。

一般来讲,要用符号运算方法表示、计算和绘制信号波形,可以直接调用在 MATLAB 的符号工具箱中存在的符号函数。但应注意的是,函数 `ezplot` 只能画出既存在于符号工具箱中又存在于总 MATLAB 工具箱中的函数。因此,若要用 `ezplot` 画出仅存在于符号工具箱中函数波形,就需要用户在自己的工作目录 `work` 下创建一个同名同功能的函数文件。

例 9 - 5 信号的符号表达式及其波形

用符号表达式计算并绘出以下函数的波形。(1) $x_1(t) = \square(t)$;
 (2) $x_2(t) = \square(t) + \square(t-1) - 2\square(t-2)$;(3) $x_3(t) = \sin t$ (4) $x_4(t) =$

$$\frac{t}{2} [\theta(t) - \theta(t-4)].$$

解 阶跃函数在符号工具箱中是 Heaviside函数,它在总 MATLAB工具箱中并不存在,所以必须先自己创建一个 Heaviside.m函数文件(见例 9-2的方法 3)。在工作目录 work下创建 Heaviside.m函数文件之后,就可以用 ezplot绘波形了。

对于例 9-2中用数值运算方法绘制的 $x_2(t) = \theta(t) + \theta(t-1) - 2\theta(t-2)$ 的波形,也可以用 Heaviside函数的符号表达式来实现。

符号表达式的正弦函数与数值运算下的正弦函数一样都是 sin函数,故可以直接调用。

函数 $x_4(t) = \frac{t}{2} [\theta(t) - \theta(t-4)]$ 可以很方便地用符号表达式来实现。

M文件如下:

```
x1 = sym('Heaviside(t)'); subplot(2,2,1); ezplot(x1, [-1,1])
x2 = sym('Heaviside(t) + Heaviside(t-1) - 2* Heaviside(t-2)');
subplot(2,2,2); ezplot(x2, [-1,3])
x3 = sym('3* sin(0.5* pi* t)'); subplot(2,2,3); ezplot(x3)
x4 = sym('(t/2)* (Heaviside(t) - Heaviside(t-4))');
subplot(2,2,4); ezplot(x4, [-1,5])
```

波形如图 9-10所示。

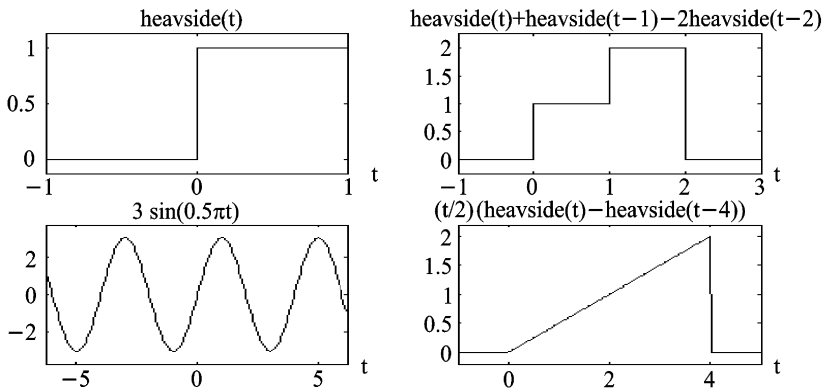


图 9-10 用符号运算方法绘制的函数波形