

MATLAB

MATLAB 仿真在信号处理 中的应用

徐明远 刘增力 编著



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

TN911.72/197

2007

MATLAB

仿真在信号处理中的应用

徐明远 刘增力 编著

西安电子科技大学出版社

2007

内 容 简 介

本书通过覆盖信号处理学科各个知识点的简单明了的实例介绍,使读者用较短的时间学会利用 MATLAB 软件工具解决相关问题的基本方法。

全书共分 9 章。第 1、2 章介绍应用 MATLAB 进行数学运算、数据可视化表达的方法。第 3 章介绍信号的时域和频域分析以及常用信号的频谱。第 4~7 章分别介绍数字信号处理、声音信号处理、图像信号处理及视频信号处理的应用实例。第 8、9 章介绍 MATLAB 在小波变换、阵列信号处理中的应用。

本书可作为高等学校电子信息类,特别是与信号处理有关学科的本科高年级学生和研究生教材或参考书,还可作为从事信号处理建模和仿真研究的工程技术人员的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

MATLAB 仿真在信号处理中的应用/徐明远,刘增力编著.

—西安:西安电子科技大学出版社,2007.11

ISBN 978-7-5606-1904-0

I. M… II. ①徐… ②刘… III. 数字信号—信号处理—计算机辅助计算—软件包, MATLAB IV. TN911.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 136997 号

策 划 臧延新

责任编辑 王 瑛 张 媛

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)88242885 88201467 邮 编 710071

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

经 销 新华书店

印刷单位 西安文化彩印厂

版 次 2007 年 11 月第 1 版 2007 年 11 月第 1 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 20.875

字 数 494 千字

印 数 1~4000 册

定 价 30.00 元

ISBN 978-7-5606-1904-0/TP·0986

XDUP 2196001-1

*** 如有印装问题可调换 ***

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

前 言

信号处理技术正在迅速地应用于军事、工业、控制、通信、家电等领域,多媒体技术也在迅速地进入人们的生活、工作和学习中。过去这些领域的相关知识只是少数专业人士所拥有,但今后这些知识将是大量从事电子、信息工程的技术人员需要了解的常识。信号处理、数字音/视频技术、多媒体技术已经在大学的相关学科中成为十分普通的课程。但是抽象的公式和复杂的计算方法已成为掌握这些技术的重要障碍。

信息学科发展突飞猛进,在有限的教学时间里,使学生较好地掌握必需的基础知识和更多更新的专业知识,在试验与科学研究方面尽早使学生掌握先进的试验方法、数据处理工具和数据可视化表达的方法,提高数据处理的能力与工作效率,是近年来我们努力探索的教学方法和模式。

MathWorks 公司推出的 MATLAB 软件是学习数理知识的好帮手。它有与人们的思维方式及书写方式十分接近的语法及表达方式,包含了代表众多的大师辛勤劳动结晶的高效、简捷、功能强大的指令及功能模块,使得高深、复杂的理论问题和数学公式的求解变得简单。

教学的实践表明:学生能够早一些了解、掌握该软件工具的功能,可以提高学生的学习效率、质量和积极性,可以帮助学生打下扎实的数理基础。应用 MATLAB 的强大功能,可以对学习过去十分难学、很多人望而生畏的课程提供有力的帮助,让更多的人掌握更多的相关知识。

在科学研究、产品研发领域,在理解了基本理论的基础上,能够应用 MATLAB 软件工具进行建模和仿真试验,是理论和实践结合的第一步。当掌握了这个十分有用的研究开发工具后,将能够利用它进行基础的单元试验直至复杂的系统试验。MATLAB 丰富的指令和众多模块搭建的试验环境,以及高效率的试验方法与多方面数据处理、分析及表现方式,为研究人员得出对实践有参考价值的结果节约了大量时间。现在,通过需求分析,应用 MATLAB 进行系统仿真,进一步得出信号处理芯片的代码,制造芯片,再进行设备制造的研发模式已经是中外科技人员共同采用的方法。可以说,建模、仿真方法的学习与训练,是培养新型研发人才的重要途径。

本书通过精心编排的实例,可以使读者用较短的时间学会利用 MATLAB 软件工具解决本学科相关问题的基本方法。书中的实例分三类:具有代表性的 MATLAB 软件演示实例;其他参考书上较典型的实例;作者在科研与教学实践中的积累。作者认为通过实例可以较快地掌握指令和模块的使用方法,了解应用 MATLAB 解决本学科问题的切入途径。因此,书中仅对重要的原理进行了简要的回顾,而重点是通过实例,介绍应用 MATLAB 软件工具来解决该类问题的方法。

本书共分 9 章,第 1~7 章由徐明远撰写,第 8、9 章由刘增力撰写。

本书的出版得到了林华芳教授、王成教授的大力支持，一些年轻同志如徐晟、和丽芳、徐晨、王庆平、李辉、徐阳等也给予了热情的帮助，在此表示诚挚的感谢。对研究生胡浩、唐菁敏所做的工作，在此一并表示感谢！

作 者

2007 年 10 月

目 录

第 1 章 基本数学运算	1
1.1 初等数学的 MATLAB 实现	2
1.1.1 用 MATLAB 求三角函数	2
1.1.2 指数、对数的 MATLAB 实现	6
1.1.3 解析几何的 MATLAB 实现	8
1.1.4 多项式运算和因式分解的 MATLAB 实现	12
1.1.5 其他运算的 MATLAB 实现	13
1.2 线性方程与矩阵的 MATLAB 实现	18
1.2.1 用 MATLAB 求线性方程组	18
1.2.2 矩阵运算的 MATLAB 实现	19
1.3 微积分的 MATLAB 实现	31
1.3.1 用 MATLAB 求极限	31
1.3.2 微分与积分的 MATLAB 求解	31
1.3.3 微分方程的 MATLAB 求解	37
1.4 特殊函数的 MATLAB 实现	39
1.5 随机信号	43
1.5.1 随机信号的统计特性	43
1.5.2 常用随机信号	43
第 2 章 数据可视化表达	48
2.1 图形特性设置	48
2.2 各种二维图形的绘制	53
2.3 三维线状图形的绘制	60
2.4 三维面状图形的绘制	64
2.5 动画的制作	67
第 3 章 信号的时域和频域分析	71
3.1 时域分析	71
3.2 频域分析	75
3.2.1 DFT 与 FFT 原理	75
3.2.2 两种频域仿真方法	76
3.2.3 频谱分析的若干问题	81
3.3 常用信号的频谱分析	84
3.3.1 基础波形	85
3.3.2 调制信号	87
3.3.3 通信与广播系统	99
3.4 谱估计	115

第 4 章 数字信号处理	120
4.1 离散数字信号的表示与计算	120
4.1.1 离散数字信号的表示	120
4.1.2 加减乘除运算	123
4.1.3 累加与累乘	123
4.1.4 卷积	124
4.2 时间卷积与频率卷积	125
4.3 各种变换	129
4.4 线性系统	132
4.4.1 差分方程	132
4.4.2 线性系统的各种表达方式	135
4.4.3 传输函数	138
4.5 滤波器设计	144
4.5.1 巴特沃斯滤波器	144
4.5.2 切比雪夫滤波器	150
4.5.3 椭圆滤波器	156
4.5.4 FIR 滤波器	158
4.5.5 特殊滤波器	164
4.5.6 窗函数	170
第 5 章 声音信号处理	174
5.1 声音的录制与播放	174
5.2 声音信号的时频特性显示	176
5.2.1 短时傅里叶变换的基本原理	176
5.2.2 声音信号实时分析	177
5.2.3 多普勒效应	180
5.2.4 对野象声音作时频分析	182
5.3 键盘仿真	183
5.3.1 小钢琴键盘仿真	183
5.3.2 双音多频键盘仿真	185
5.4 声音滤波特性试验	188
5.4.1 心电图	188
5.4.2 声音消噪	189
5.5 声音信号编码	191
5.5.1 A 律 PCM 编解码	191
5.5.2 线性预测语音分析与合成	193
5.5.3 G.711 标准的试验	196
5.6 其他应用	198
5.6.1 声音可懂度的试验	198
5.6.2 声测	199
5.6.3 声音加密	200
第 6 章 图像信号处理	201
6.1 图像信号显示与图像格式变换	201

6.1.1	图像的调入与显示	201
6.1.2	图像格式的转换	203
6.2	图像的基本运算	205
6.2.1	图像相加	205
6.2.2	图像相减	205
6.2.3	图像相乘	206
6.2.4	图像相除	207
6.2.5	图像求反	208
6.3	图像变形	208
6.3.1	图像翻转	208
6.3.2	图像旋转	209
6.3.3	图像卷绕	211
6.3.4	图像插值	213
6.4	对比度调节与图像灰度直方图均衡	214
6.4.1	对比度调节	214
6.4.2	图像灰度直方图均衡	214
6.5	图像的颜色表达	217
6.5.1	数值与颜色的关系	217
6.5.2	配色实验	218
6.5.3	分色实验	219
6.6	图像压缩实验	220
6.6.1	DCT 变换	220
6.6.2	离散余弦变换图像压缩	222
6.7	图像信号处理初步	226
6.7.1	图像滤波器处理	226
6.7.2	图像边缘信息提取	232
6.7.3	四叉树分解	235
6.7.4	图像形态学处理	238
6.7.5	其他处理例子	241
第 7 章	视频信号处理	246
7.1	视频信号的表示	246
7.2	视频信号处理	249
7.2.1	形态学处理	249
7.2.2	统计直方图	250
7.2.3	视频信号周期噪声的消除	251
7.2.4	提取边沿	254
7.2.5	视频信号变换	255
7.3	视频信号压缩	258
7.3.1	基本原理	258
7.3.2	视频亮度信号压缩仿真系统框图	258
7.3.3	运动补偿与分帧	259
7.3.4	DCT 变换	264
7.3.5	量化及编解码	265

7.4 其他应用	267
7.4.1 路口跟踪车辆视频图	267
7.4.2 自动聚焦演示	270
第8章 小波分析	275
8.1 小波分析的基本理论	275
8.1.1 连续小波分析	275
8.1.2 离散小波分析	276
8.1.3 小波基的选取	276
8.1.4 多分辨率分析	278
8.2 应用实例	280
第9章 阵列信号处理	290
9.1 阵列信号处理的基本理论	290
9.1.1 空域滤波概念	290
9.1.2 空间信号表示	292
9.1.3 阵列天线建模	292
9.2 波束形成	294
9.3 DOA 估计技术	294
9.3.1 传统的 DOA 估计方法	294
9.3.2 DOA 估计的子空间算法	303
9.4 矢量传感器阵列信号处理	313
9.4.1 矢量传感器模型	313
9.4.2 矢量传感器延迟-相加法	315
9.4.3 矢量传感器 Capon 最小方差法	315
9.4.4 矢量传感器常规 MUSIC 法	316
9.4.5 矢量传感器空间平滑技术	316
9.4.6 仿真结果	316
参考文献	325

第1章 基本数学运算

数学是学习专业知识、进行工程设计与实践,以及从事科学研究的重要基础和工具。具有扎实的数学基础意味着:一方面能够将工程、科研问题变成相关的数学问题(有时是建立数学模型);另一方面可以熟练地应用数学工具来解决上述问题。MATLAB 软件可以在上述两个方面为用户提供很好的帮助。随着科学技术的进步,相关领域的知识迅速增长。许多数学工具虽然学过,但真正要用却记不住,另外,复杂的运算也不是多数人能够胜任的。本章中的例子基本覆盖了利用率较高的知识点,可以帮助读者较快地切入主题。许多较为复杂的运算,如求解线性方程组、微分方程、微分方程组,进行快速傅里叶变换等,通过 MATLAB 的一条指令就可以解决,读者可以从下面的例子中体会这些指令的用法,从而举一反三。这样练习几个回合之后,不仅巩固了数学知识,解决数学问题的速度与效率也会因为熟练掌握了相关的指令而大为提高,进行学习、科研、工程实践的信心与能力也会随之增强。

目前,科研与工程实践中的许多问题已经演化为用解析式表达的方程式或方程组。解析式的推演、运算称为符号运算。多数用于科学计算的软件,只能在解析式的基础上用数值计算的方法来完成相关的任务。MATLAB 软件工具除了可以用数值计算的方法来完成相关的任务以外,符号运算也是它的一大功能。例如:

```
f=sym('')
```

```
syms x y
```

等指令就是表示符号运算的开始。

又如:

```
syms arg1 arg2 ... real
```

可表示为

```
arg1 = sym('arg1', 'real');
```

```
arg2 = sym('arg2', 'real');
```

```
...
```

以上指令表示变量 arg1、arg2 的实部;若用 positive 代替 real,则表示变量 arg1、arg2 的正的部分。

再如:

```
expand(f) (展开)
```

```
simple(d) (简化)
```

等也是表示符号运算的指令。

信号处理中的许多原理与运算,需要初等数学的知识,而且许多高等数学的知识的导出与理解也与初等数学的基础分不开。因此,下面首先复习一下初等数学的内容。

1.1 初等数学的 MATLAB 实现

1.1.1 用 MATLAB 求三角函数

通信工程中的调制、解调、超外差接收、互调干扰等问题的分析与讨论都离不开基本的三角运算。MATLAB 软件除了具有全部三角函数计算的相关指令(如 $\sin$ 、 $\cos$ 、 $\tan$ 、 $\cot$ 等)外,还有符号运算的功能,可以进行解析式的运算。可以说, MATLAB 具备了过去常用的三角函数表、数学手册的功能。

【例 1-1】余弦倍角的展开。

(1) 求 $\cos(4x)$ 的展开式。

主要指令: `expand`(展开)。

【程序 1-1(a)】

```
clear
f=sym('cos(4 * x)');
F1=expand(f)
```

结果:

$$F1 = 8 * \cos(x)^4 - 8 * \cos(x)^2 + 1$$

(2) 求 $\cos(6x)$ 的展开式。

【程序 1-1(b)】

```
clear
syms x;
F2=expand(cos(6 * x))
```

结果:

$$F2 = 32 * \cos(x)^6 - 48 * \cos(x)^4 + 18 * \cos(x)^2 - 1$$

【例 1-2】余弦差角的展开。

(1) 求 $\cos(3x-y)$ 的展开式。

【程序 1-2(a)】

```
clear
f=sym('cos(3 * x-y)');
F1=expand(f)
```

结果:

$$F1 = 4 * \cos(y) * \cos(x)^3 - 3 * \cos(y) * \cos(x) + 4 * \sin(y) * \sin(x) * \cos(x)^2 - \sin(y) * \sin(x)$$

(2) 求 $\cos(x+2y)$ 的展开式。

【程序 1-2(b)】

```
clear
syms x y;
F2=expand(cos(x+2 * y))
```

结果:

$$F2 = 2 * \cos(x) * \cos(y)^2 - \cos(x) - 2 * \sin(x) * \sin(y) * \cos(y)$$

【例 1-3】 三角函数的简化(1)。

简化 $d = \cos^4(x) + \sin^4(x)$ 。

主要指令: simple(简化)。

【程序 1-3】

```
syms x y
d=cos(x).^4+sin(x).^4;
d=simple(d)
```

结果:

$$d = 1/4 * \cos(4 * x) + 3/4$$

【例 1-4】 三角函数的简化(2)。

简化 $f1 = \cos(y)\cos(x) - \sin(y)\sin(x)$; $f2 = \cos(y)\sin(x) + \sin(y)\cos(x)$ 。

【程序 1-4】

```
clear
syms x y
f1=cos(y)*cos(x)-sin(y)*sin(x)
F1=simple(f1)
f2=cos(y)*sin(x)+sin(y)*cos(x)
F2=simple(f2)
```

结果:

$$F1 = \cos(y+x)$$

$$F2 = \sin(y+x)$$

【例 1-5】 三角函数(正弦、余弦、正切、余切)的作图。

在 360° 范围内作正弦、余弦、正切、余切的图形。

注意: 正切、余切函数有无穷大点, 应该在自变量 t 的选取时就避开。纵坐标的正确选取(勿太大)可以较好地展示纵坐标为零附近的特性。plot($t, x, 'r'$)是常用的绘图语句, t 、 x 、 $'r'$ 分别表示自变量、函数、线条的颜色(红)。

主要指令: sin cos tan cot(正弦、余弦、正切、余切函数); subplot(画子图); legend(图例)。

【程序 1-5】

```
clear
t=(1:2:359)*pi/180;
subplot(121)
a=sin(t);
b=cos(t);
plot(t, a, 'r', t, b, 'b. ');
legend('a=sin(t)', 'b=cos(t)'); grid
subplot(122)
t1=(1:2:89)*pi/180; t2=(91:2:179)*pi/180;
t3=(181:2:269)*pi/180; t4=(271:2:359)*pi/180;
```

%自变量分段取值, 避开极大值点

```
C1=tan(t1);C2=tan(t2);C3=tan(t3);C4=tan(t4);
```

```
D1=cot(t1);D2=cot(t2);D3=cot(t3);D4=cot(t4);
```

```
plot(t1, C1, 'r', t1, D1, 'b.', t2, C2, 'r', t2, D2, 'b.')
```

```
hold on
```

```
plot(t3, C3, 'r', t3, D3, 'b.', t4, C4, 'r', t4, D4, 'b.')
```

```
legend('C=tan(t)', 'D=cotan(t)');
```

```
axis([0, 2 * pi, -10, 10]); grid
```

```
hold off
```

程序运行结果如图 1-1 所示。

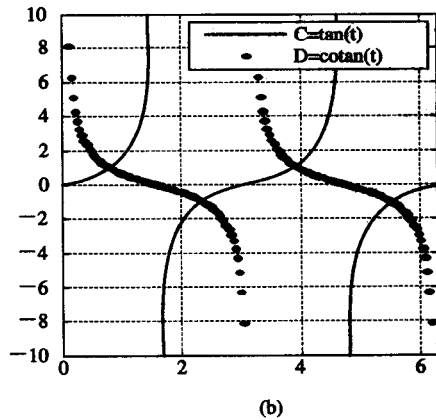
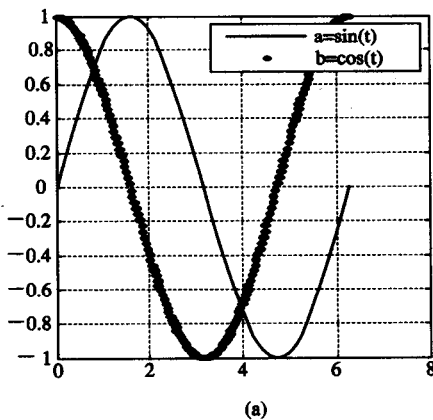


图 1-1 三角函数的图形

(a) 正弦、余弦的图形; (b) 正切、余切的图形

【例 1-6】三角函数作图实例。

在 0~10 范围内作 $d=\cos^4(x)+\sin^4(x)$ 及 $F=\frac{1}{4}\cos(4x)+\frac{3}{4}$ 的图形。

注意: hold on 指令的作用是可以画在同一画框内画多个图形; “+.2”的作用是将图形上移 2 格。

【程序 1-6】

```
clear
```

```
x=0:.01:10;
```

```
d=cos(x).^4+sin(x).^4;
```

```
plot(x, d)
```

```
hold on
```

```
F=1/4*cos(4*x)+3/4;
```

```
plot(x, F+.2, 'r.')
```

```
legend('d', 'F')
```

```
grid
```

程序运行结果如图 1-2 所示。

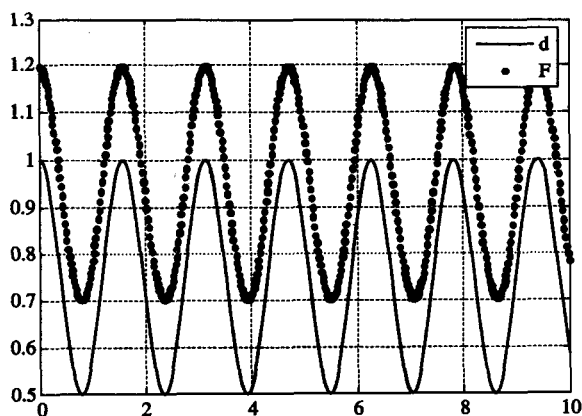


图 1-2 正弦函数多图

【例 1-7】 三角函数表的形成。

早年的科技工作者离不开六位数学用表，后来发展到使用计算器。利用 MATLAB 可以方便地形成自己常用的三角函数表及对数表。下面是一个正弦、余弦函数 $0 \sim 180^\circ$ 的数值表，应注意的是 MATLAB 中三角函数里自变量的单位是弧度。

【程序 1-7】

```
t=[0:15:180]. * pi/180;
t1=[0:15:180];
a=sin(t);
b=cos(t);
[t1' a' b']
```

% 在指令窗列出 13 行 3 列的三角函数表，3 列分别是角度 t1、sin(t) 和 cos(t)

结果：

0	0	1.0000
15.0000	0.2588	0.9659
30.0000	0.5000	0.8660
45.0000	0.7071	0.7071
60.0000	0.8660	0.5000
75.0000	0.9659	0.2588
90.0000	1.0000	0.0000
105.0000	0.9659	-0.2588
120.0000	0.8660	-0.5000
135.0000	0.7071	-0.7071
150.0000	0.5000	-0.8660
165.0000	0.2588	-0.9659
180.0000	0.0000	-1.0000

1.1.2 指数、对数的 MATLAB 实现

【例 1-8】 对数的运算。

分别计算数 100 的自然对数与常用对数以及数 256 以 2 为底的对数。对数计算中应注意的是以什么为底, 0 和负数没有对数。

主要指令: $\log$ (计算自然对数); $\log_{10}$ (计算常用对数); $\log_2$ (计算以 2 为底的对数)。

【程序 1-8】

```
clear
b=log(100);           %计算自然对数
c=log10(100);         %计算以 10 为底的对数(常用对数)
d=log2(256);          %计算以 2 为底的对数
[ b c d]
%在指令窗列出 1 行 3 列的计算结果
```

结果:

```
4.6052    2.0000    8.0000
```

【例 1-9】 对数表的形成。

列出 1~10 的自然对数及常用对数。

【程序 1-9】

```
a=[1:1:10];          %设置 a 的范围
b=log(a);             %求自然对数
c=log10(a);           %求常用对数
[a' b' c']
```

%在指令窗列出 10 行 3 列对数表, 3 列分别是 a、a 的自然对数和 a 的常用对数

结果:

1.0000	0	0
2.0000	0.6931	0.3010
3.0000	1.0986	0.4771
4.0000	1.3863	0.6021
5.0000	1.6094	0.6990
6.0000	1.7918	0.7782
7.0000	1.9459	0.8451
8.0000	2.0794	0.9031
9.0000	2.1972	0.9542
10.0000	2.3026	1.0000

【例 1-10】 指数函数表的形成。

列出 1~10 分别以 e、2、3 为底的指数表。

主要指令: $\exp$ (以 e 为底的指数函数); pow_2 (以 2 为底的指数函数); $3.^{\cdot}$ (以 3 为底的指数函数)。

【程序 1-10】

```
a=[1:1:10];          %设置 a 的范围
```

```

b=exp(a);           %求以 e 为底的指数函数
c=pow2(a);          %求以 2 为底的指数函数
d=3.^(a);           %求以 3 为底的指数函数
[a' b' c' d']       %在指令窗列出 10 行 4 列指数表

```

结果:

```

1.0e+004
0.0001    0.0003    0.0002    0.0003
0.0002    0.0007    0.0004    0.0009
0.0003    0.0020    0.0008    0.0027
0.0004    0.0055    0.0016    0.0081
0.0005    0.0148    0.0032    0.0243
0.0006    0.0403    0.0064    0.0729
0.0007    0.1097    0.0128    0.2187
0.0008    0.2981    0.0256    0.6561
0.0009    0.8103    0.0512    1.9683
0.0010    2.2026    0.1024    5.9049

```

【例 1-11】 声压表的形成。

列出声压为 10^3 , 10^2 , ..., 10^{-2} , 且以分贝为单位的声压表。

【程序 1-11】

```

a=10^-12;           %a 是 10 的负 12 次幂, 0 dB 基准
x=[10^3 10^2 10^1 10^0 10^-1 10^-2]; %给出 x 的取值
m=x/a;              %求 x 与 a 的比值
y=10*log10(m)        %计算分贝值

```

结果:

```

y= 150    140    130    120    110    100    dB

```

【例 1-12】 绘制指数对数图。

画出过原点的 45° 直线以及从 0.1 到 5 之间的自然对数和以 e 为底从 -2 到 2 的指数函数图。

【程序 1-12】

```

clear
x1=(0.1;0.1;5);
y1=log(x1);          %求变量 x1 的对数函数
x2=(-2;0.1;2);
y2=exp(x2);          %求变量 x2 的指数函数
x3=(-2;0.1;5);
y3=x3;               %求 y=x
plot(x1, y1, 'r', x2, y2, 'b.', x3, y3, 'k.-');
legend('y1=log(x1)', 'y2=exp(x2)', 'y3=x3') %图例
grid

```

运行结果如图 1-3 所示。

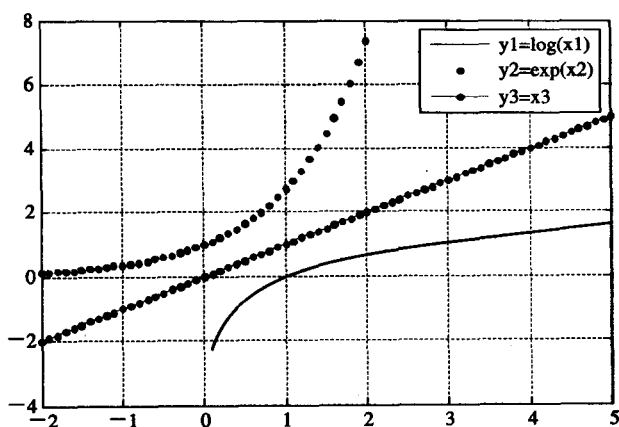


图 1-3 指数对数图

1.1.3 解析几何的 MATLAB 实现

【例 1-13】 绘制直线方程图。

画出斜率为 1，截距为 2 的直线。

【程序 1-13】

```
a=1;           %斜率
b=2;           %截距
x=-4:1:6;
y = x .* a + b;
plot(x, y); grid
legend('直线方程')
axis([-4 6 -2 8])
```

运行结果如图 1-4 所示。

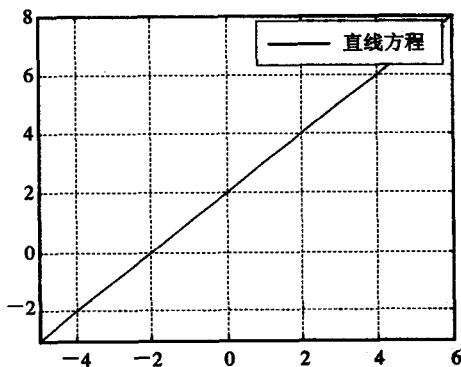


图 1-4 直线方程图

【例 1-14】 绘制圆方程图。

画出圆心为(-3, 4)，半径为 2 的圆。

【程序 1-14】

```
a=-3; b=4;
r=2;
x=(a-r):0.01:(a+r);
y1=-sqrt(r.^2-(x-a).^2)+b;
y2= sqrt(r.^2-(x-a).^2)+b;
plot(x, y1, 'b', x, y2, 'b');
grid
legend('圆方程')
axis([-6 0 1 7])
axis square
```

%圆心坐标

%圆半径

%下半圆表达式

%上半圆表达式

运行结果如图 1-5 所示。