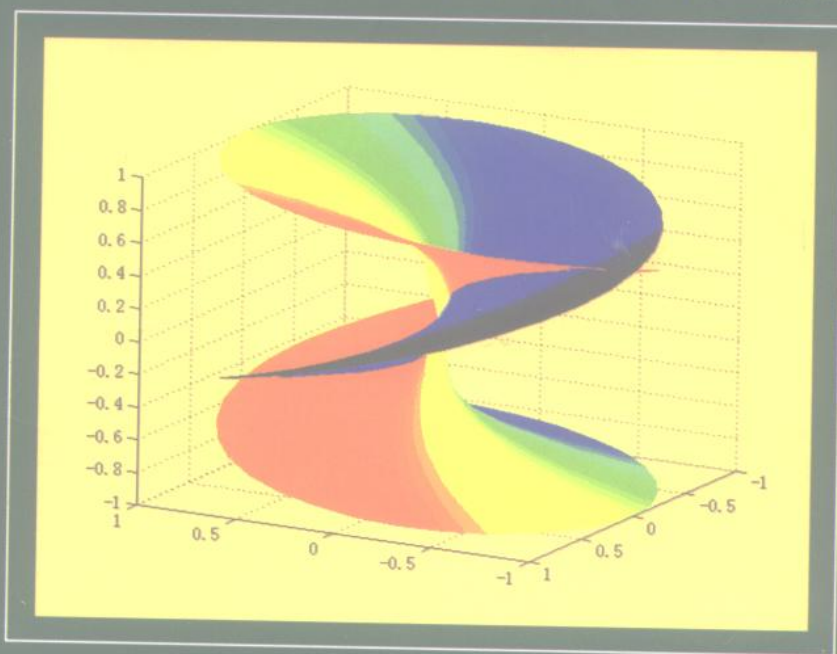


MATLAB 语言应用系列书

# 应用 MATLAB 语言

## 处理数字信号与数字图像

陈桂明 张明照 戚红雨 编著



科学出版社

# 应用 MATLAB 语言处理 数字信号与数字图像

陈桂明 张明照 戚红雨 编著



410502

科学出版社

2000

## 内 容 简 介

MATLAB 语言是一种简单、高效、功能极强的高级语言。在科学与工程计算领域它有着其它语言无与伦比的优势。本书以最新的 MATLAB 5.1 版本为对象,从实际应用的角度对数字信号、数字图像处理和小波分析作了浅显易懂的介绍,书中列举了作者在实际教学和科研工作中总结的二百多个实例,既介绍了 MATLAB 的一般用法,包括常用命令、语法规则、矩阵运算、数学函数、文件的输入输出以及二三维图形的绘制等,又介绍了比较复杂的图形用户界面及各控件的回调函数的编写方法。

本书重点介绍了 MATLAB 中与数字信号、数字图像处理和小波分析有关的一些函数的用法及一些处理方法和算法。通过学习,读者能够熟练应用 MATLAB 语言实现并改进各种算法。

本书可作为高等学校数学、计算机、电子工程、信息工程、机械工程等专业师生的参考教材,对从事上述领域工作的广大科技工作者和开发应用人员具有重要参考价值,对于学习小波的读者来说,也不失为一本极好的入门教材。

### 图书在版编目(CIP)数据

应用 MATLAB 语言处理数字信号与数字图像/陈桂明等编著.-北京:科学出版社,2000  
ISBN 7-03-007848-9

I. 应…… II. 陈… III. ①数字信号-信号处理-图形软件,MATLAB  
②数字图像-图像处理-图形软件,MATLAB IV. TP3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 38930 号

JS420/23

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号  
邮政编码:100717

新蕾印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

\*

2000 年 1 月第 一 版 开本: 787 × 1092 1/16  
2000 年 1 月第一次印刷 印张: 23 1/2  
印数: 1—4 000 字数: 542 000

定价: 35.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

# 前 言

MATLAB 的意思是矩阵实验室, MATLAB 语言在矩阵运算和数值计算等方面, 具有强大的功能, 非常直观、简洁, 且效率高, 交互性好, 因而它在科学与工程计算方面的优势是显而易见的。它既可以作为一种功能强大的“计算器”, 又可作为一个计算工具在其它应用程序中调用。

随着版本的不断提高, MATLAB 的功能越来越强大, 应用范围越来越广泛, 如今它几乎覆盖了所有的科学和工程计算领域, 如仿真技术、自动控制、数字信号处理、数字图像处理、系统辨识、神经网络、小波分析等等。因此, 掌握 MATLAB 这一工具, 无论对于科技工作者, 还是高校学生来讲, 都具有十分重大的意义。本书作为一本学习 MATLAB 的教材和参考书, 以最新的 MATLAB 5.1 版本为对象介绍了 MATLAB 的一般用法, 包括常用命令、语法规则、矩阵运算、数学函数、文件的输入输出以及二三维图形的绘制等等; 又介绍了比较复杂的图形用户界面及各控件的回调函数的编写方法。通过阅读本书, 读者可以很快地掌握 MATLAB 语言, 并在很短的时间内达到精通的水平。

数字信号与数字图像处理技术的掌握与运用, 必须具有扎实的理论知识, 并能够熟练地使用一些工具。本书为了使读者能够在较短的时间内对相关的理论知识有一个突破, 并且能够熟练地使用 MATLAB 工具解决实际问题, 书中不仅对理论知识做了系统的概括与总结, 而且对 MATLAB 中有关数字信号处理和数字图像处理的实现算法做了详尽的描述。

本书共分八章。第 1 章介绍了 MATLAB 的基本知识和语法规则及其常用命令和函数; 第 2 章介绍了 MATLAB 中波形发生函数与采样率转换函数及其使用方法; 第 3 章、第 4 章介绍了数字滤波器的有关知识与 MATLAB 中有关函数及其使用方法; 第 5 章介绍了 MATLAB 中参数模型与时序分析的函数及有关理论; 第 6 章为数字图像处理部分; 第 7 章为小波分析与应用部分, 介绍了一些与小波有关的概念, 以及小波分析在数字信号处理和数字图像处理中的具体应用函数与例子; 第 8 章论述了 MATLAB 的图形用户界面创建。书末还给出了一个综合应用实例。

由于作者水平有限, 错误和不当之处在所难免, 恳请得到专家、读者的指正。

作者

1999 年 3 月

# 目 录

<b>第 1 章 精通 MATLAB</b> .....	( 1 )
1.1 MATLAB 通用命令介绍 .....	( 1 )
1.1.1 管理命令与函数 .....	( 1 )
1.1.2 变量和工作空间管理命令与函数 .....	( 2 )
1.2 运算符和特殊字符 .....	( 4 )
1.3 MATLAB 语言结构 .....	( 12 )
1.3.1 控制流 .....	( 12 )
1.3.2 输入与输出 .....	( 14 )
1.4 基本矩阵及矩阵运算 .....	( 27 )
1.4.1 MATLAB 内部特殊变量和常数 .....	( 27 )
1.4.2 矩阵及其输入 .....	( 33 )
1.4.3 特殊矩阵和数组 .....	( 34 )
1.4.4 矩阵的运算 .....	( 45 )
1.4.5 MATLAB 矩阵非线性运算函数 .....	( 55 )
1.4.6 矩阵的相似变换与分解 .....	( 91 )
1.5 数据分析 .....	( 98 )
1.5.1 数据基本操作 .....	( 98 )
1.5.2 数值分析 .....	( 108 )
1.6 MATLAB 图形函数 .....	( 114 )
1.6.1 二维图形函数与命令 .....	( 114 )
1.6.2 三维图形函数 .....	( 119 )
<b>第 2 章 采样与波形发生</b> .....	( 124 )
2.1 采样定理 .....	( 124 )
2.2 重采样 .....	( 125 )
2.2.1 下采样 .....	( 126 )
2.2.2 上采样 .....	( 128 )
2.3 采样率的非整数倍转换 .....	( 129 )
2.4 采样率的分级转换 .....	( 130 )
2.5 MATLAB 中有关的函数 .....	( 131 )
<b>第 3 章 IIR 数字滤波器的设计与应用</b> .....	( 140 )
3.1 滤波器的基本概念 .....	( 140 )
3.1.1 滤波器的定义及特性 .....	( 140 )
3.1.2 滤波器的分类 .....	( 140 )
3.1.3 IIR 及 FIR 滤波器的设计方法简介 .....	( 141 )
3.2 滤波器的表达方式 .....	( 141 )

---

3.2.1	滤波器的传递函数模型	(141)
3.2.2	滤波器的状态方程模型	(143)
3.2.3	滤波器的零极点增益模型	(143)
3.2.4	滤波器数学模型之间的相互转换	(143)
3.3	低通模拟滤波器原形	(145)
3.4	低通、高通、带通及带阻滤波器的设计	(149)
3.5	IIR 数字滤波器阶数选择	(153)
3.6	冲激响应不变法	(156)
3.7	双线性变换法	(158)
3.8	IIR 数字滤波器的设计	(162)
3.9	滤波器的特性分析	(171)
3.10	滤波器的实现	(177)
3.11	二维数字滤波器	(180)
3.11.1	二维数字滤波器的基本特性	(180)
3.11.2	二维数字滤波器的 MATLAB 实现	(181)
<b>第 4 章</b>	<b>FIR 数字滤波器的设计</b>	<b>(182)</b>
4.1	FIR 数字滤波器的特性	(182)
4.2	FIR 数字滤波器的设计	(183)
4.2.1	Fourier 级数展开法	(183)
4.2.2	窗函数法	(185)
4.2.3	频域设计法	(188)
4.2.4	Chebyshev 逼近法	(189)
4.3	MATLAB 中的有关函数	(191)
<b>第 5 章</b>	<b>随机信号的参数模型和谱估计</b>	<b>(201)</b>
5.1	自相关函数的估计	(201)
5.2	参数模型	(202)
5.3	MATLAB 中有关的函数	(211)
<b>第 6 章</b>	<b>数字图像处理</b>	<b>(225)</b>
6.1	计算机数字图像文件	(225)
6.1.1	数字图像文件格式	(225)
6.1.2	数字图像文件操作	(230)
6.1.3	图像显示	(232)
6.2	图像的矩阵表示及正交变换	(234)
6.2.1	图像的矩阵和向量表示	(234)
6.2.2	图像像素值及其统计	(234)
6.2.3	图像矩阵运算	(238)
6.2.4	图像的正交变换	(238)
6.3	图像增强	(246)
6.3.1	对比度增强	(246)
6.3.2	图像平滑	(251)

---

6.3.3	图像锐化 .....	(256)
6.3.4	MATLAB 中与图像处理有关的二维线性滤波器及线性滤波器设计 .....	(258)
6.4	数字图像操作与分析 .....	(262)
6.4.1	二进制图像操作 .....	(262)
6.4.2	颜色图操作 .....	(266)
6.4.3	图像邻域及块操作 .....	(267)
6.4.4	基于区域图像处理 .....	(268)
6.4.5	图像分析 .....	(269)
6.4.6	图像几何运算 .....	(270)
<b>第 7 章</b>	<b>小波在信号处理和图像处理中的应用</b> .....	<b>(273)</b>
7.1	小波概述 .....	(273)
7.1.1	Fourier 分析与小波分析 .....	(273)
7.1.2	有关小波的基本概念 .....	(274)
7.1.3	MATLAB 中有关小波的函数与命令 .....	(282)
7.2	小波族 .....	(289)
7.2.1	Haar 小波 .....	(289)
7.2.2	Daubechies 小波 .....	(290)
7.2.3	双正交样条小波 .....	(292)
7.2.4	Coiflets 小波 .....	(295)
7.2.5	Symlets 小波 .....	(296)
7.2.6	Morlet 小波 .....	(297)
7.2.7	Mexican Hat 小波 .....	(298)
7.2.8	Meyer 小波 .....	(299)
7.2.9	Battle-Lemarie 小波 .....	(301)
7.3	小波应用 .....	(301)
7.3.1	小波分析在一维数字信号处理中的应用 .....	(301)
7.3.2	小波分析在数字图像处理中的应用 .....	(307)
<b>第 8 章</b>	<b>图形用户界面的创建</b> .....	<b>(315)</b>
8.1	图形用户界面(GUI)的简介 .....	(315)
8.2	句柄图形对象 .....	(315)
8.2.1	句柄的产生 .....	(315)
8.2.2	句柄的创建方式 .....	(315)
8.3	句柄操作 .....	(316)
8.3.1	GET()函数 .....	(316)
8.3.2	SET()函数 .....	(317)
8.3.3	缺省属性的设置 .....	(318)
8.3.4	GCF()、GCA()、GCO()函数 .....	(319)
8.3.5	findobj()和 copyobj()函数 .....	(319)
8.3.6	reset()和 delete()函数 .....	(319)
8.4	图形窗口的设置 .....	(320)
8.5	菜单的创建 .....	(322)

8.6	控制框的设计方法 .....	(324)
8.7	对话框的设计 .....	(327)
8.7.1	帮助窗口 .....	(327)
8.7.2	错误对话框 .....	(328)
8.7.3	警告对话框 .....	(328)
8.7.4	问题对话框 .....	(329)
8.7.5	文件名处理对话框 .....	(329)
8.7.6	颜色设置对话框 .....	(330)
8.7.7	字体设置对话框 .....	(331)
8.8	Sptool 工具 .....	(332)
<b>综合实例</b> .....		(340)
<b>附录</b> .....		(357)
<b>参考文献</b> .....		(366)



# 第 1 章 精通 MATLAB

MATLAB 代表 Matrix Laboratory。MATLAB 最早是为方便矩阵存取而编写的一种软件，现已发展成为一个具有高性能数值计算和可视化功能的科学计算环境。MATLAB 集成了数值分析、矩阵计算、信号处理和图形等众多功能，具有简单易用的环境，问题的提出和解答只需以数学方式表达和描述，不需要大量原始而传统的编程过程。

MATLAB 是一个交互式系统，其基本数据元素是无需定义的数组，这样与用 Basic，C 和 Fortran 编写程序相比，就可以花费较少的时间来解决众多的数值问题。MATLAB 特别适用于研究、解决工程和数学问题，典型应用包括：一般的数值计算、算法原型以及通过矩阵公式解决一些特殊问题，促进了自动控制理论、统计、数字信号处理等学科的发展。

MATLAB 最重要的特点是它的易扩展性。每个 MATLAB 用户都可成为其有贡献作者之一，并可创造自己的应用程序。在 MATLAB 近几年的发展过程中，有许多科学家、数学家、工程师等开发了一些新的、有价值的应用程序，所有程序完全不需要使用低层代码来编写。

本书以 MATLAB 5.1 为基础，从 MATLAB 入门介绍开始，从数字信号处理及图像处理之原理和算法入手，着重阐述用 MATLAB 实现数字信号处理及图像处理的重要算法，并通过举例来说明 MATLAB 在数字信号处理及图像处理中的应用。

通过本章的学习，对 MATLAB 语言主要内容基本上可以达到精通与熟练的程度。

## 1.1 MATLAB 通用命令介绍

### 1.1.1 管理命令与函数

1. 指定 MATLAB 搜索路径：`path()`、`addpath()`与 `rmpath()`：指定、增加或删除 MATLAB 搜索路径。语法格式为

`p=path` 将搜索路径字符串值返回给字符串变量 `p`。

`path('newdir')` 将搜索路径改变为字符串 `'newdir'` 指定的路径。

`rmpath('directory')` 删除 `'directory'` 路径。

`addpath('directory')` 增加 `'directory'` 路径。

`addpath('dir1','dir2','dir3',...);`

`addpath(...,'-flag');`

其中 `flag` 值为 0 或 `begin` 表示将目录加在原搜索路径之前；1 或 `end` 表示将目录加在原来之后。

`addpath('newdir','begin')` 相当于 `path('newdir',path);`

`addpath('newdir','end')` 相当于 `path(path,'newdir')`。

2. `doc` 命令：读入超文本文件

3. help 命令: MATLAB 函数和 M-文件的在线式帮助。语法格式为 help topic topic 为要取得帮助的主题, 可缺省 topic。

4. type 命令: 在 MATLAB 命令窗口显示文件内容。语法格式为 type filename 其中 filename 为文件名, 缺省扩展名为 “.m”。

5. what 命令: 列出给定目录下的所有 M-文件、MAT-文件和 MEX-文件。语法格式为

what 列出当前目录下的上述文件;

what dirname 列出给定目录 dirname 下的上述文件; 其中: dirname 可不用全路径名称, 可用最后一层或两层路径代替。

### 1.1.2 变量和工作空间管理命令与函数

1. clear 命令: 清除内存中的对象。语法格式有

clear 清除工作空间的所有变量;

clear name 清除工作空间中的 M-文件、MEX-文件或变量 name; 如果 name 是全局变量, 从工作空间清除后, 任何定义其全局变量的函数均可访问该变量;

clear name1 name2 name3 ... 从工作空间中清除 name1, name2, name3, ...;

clear global name 从工作空间中清除全局变量 name;

clear keyword 根据不同 keyword 执行不同的操作; 如果:

keyword 为 functions 则从内存中清除现编译的 M-函数;

keyword 为 variables 则从工作空间中清除所有变量;

keyword 为 mex 则从内存中清除所有 MEX-文件;

keyword 为 global 清除所有全局变量;

keyword 为 all 清除内存中所有变量、函数、MEX-文件, 使工作空间清空。

2. disp(): 显示文本或数组。语法格式为

disp(X) 如果 X 是数组, 则显示数组内容; 若 X 包含字符串, 则显示字符串内容。

#### 例 1.1

```
Z=[1+2i,2-2i,3-i;1+i,1+i,1-i;2-i,1+3i,4+i]
```

```
Z=
```

```
1.0000+2.0000i 2.0000-2.0000i 3.0000-1.0000i
```

```
1.0000+1.0000i 1.0000+1.0000i 1.0000-1.0000i
```

```
2.0000-1.0000i 1.0000+3.0000i 4.0000+1.0000i
```

```
Str='Good Morning'
```

```
Str=
```

```
Good Morning
```

```
disp(Z)
```

```
1.0000+2.0000i 2.0000-2.0000i 3.0000-1.0000i
```

```
1.0000+1.0000i 1.0000+1.0000i 1.0000-1.0000i
```

```
2.0000-1.0000i 1.0000+3.0000i 4.0000+1.0000i
```

```
disp(Str)
```

```
Good Morning
```

3. `length()`: 计算向量长度。语法格式为

`n=length(X)` 返回 X 最长维数大小; 如果 X 是向量, 返回其长度。

**例 1.2** 以例 1.1 中的 Z 和 Str 为例

```
n=length(Z)
```

```
n=
```

```
3
```

```
l=length(Str)
```

```
l=
```

```
12
```

4. `size()`: 计算数组维数大小。语法格式为

`d=size(X)` 返回一个向量值 d, 向量中的元素值分别表示数组 X 的每维大小;

`[m,n]=size(X)` 将矩阵 X 的大小返回到变量 m, n 中;

`m=size(X,dim)` 返回 X 第 dim 指定维的大小。

**例 1.3** 仍以例 1.1 的 Z 和 Str 为例

```
d=size(Z)
```

```
d=
```

```
3 3
```

```
[m,n]=size(Z)
```

```
m=
```

```
3
```

```
n=
```

```
3
```

```
m1=size(Z,1)
```

```
m1=
```

```
3
```

```
m2=size(Z,2)
```

```
m2=
```

```
3
```

```
m3=size(Z,3)
```

```
m3=
```

```
1
```

```
[m,n]=size(Str)
```

```
m=
    1
n=
   12
```

5. who, whos: 列出内存中的变量目录。语法格式为
- who 列出当前内存中的变量;
  - whos 列出当前内存中的变量、大小, 以及是否有非零虚部;
  - who/whos global 列出工作空间中的全局变量;
  - who/whos -file filename 列出所指定 MAT 文件中的变量;
  - who/whos ... var1 var2 显示指定的变量。

**例 1.4** 以例 1.3 运行后为例

```
who
```

Your variables are:

```
Str      Z      d      m      n

whos
Name      Size      Bytes      Class

Str      1×12      24      char array
Z      3×3      144      double array(complex)
d      1×2      16      double array
m      1×1      8      double array
n      1×1      8      double array
```

Grand total is 25 elements using 200 bytes

## 1.2 运算符和特殊字符

1. “+”: 加号;  $A+B$ , 则  $A$  和  $B$  两矩阵必须有相同的大小, 或其中之一为标量, 标量可以与任意大小的矩阵相加。

**例 1.5**

```
A=
 1.0000+2.0000i  2.0000-2.0000i  3.0000-1.0000i
 1.0000+1.0000i  1.0000+1.0000i  1.0000-1.0000i
 2.0000-1.0000i  1.0000+3.0000i  4.0000+1.0000i
```

B=

```
2.0000-2.0000i  1.0000-2.0000i  3.0000-4.0000i
4.0000+2.0000i  3.0000-2.0000i  1.0000+1.0000i
2.0000+3.0000i  2.0000-3.0000i  4.0000+3.0000i
```

C=A+B

C=

```
3.0000          3.0000-4.0000i  6.0000-5.0000i
5.0000+3.0000i  4.0000-1.0000i  2.0000
4.0000+2.0000i  3.0000          8.0000+4.0000i
```

2. “-”：减号； $A-B$ ，则  $A$  和  $B$  两矩阵必须有相同的大小，或其中之一为标量，标量可以与任意大小的矩阵相减。

**例 1.6** 以例 1.5 中的  $A$  和  $B$  为例

D=A-B

D=

```
-1.0000+4.0000i  1.0000          0+3.0000i
-3.0000-1.0000i  -2.0000+3.0000i  0-2.0000i
0-4.0000i  -1.0000+6.0000i  0-2.0000i
```

3. “\*”：矩阵乘法； $C=A*B$  为两矩阵线性代数的乘积，即

$$C(i,j) = \sum_{k=1}^n A(i,k)B(k,j) \quad (1.1)$$

对于非标量  $A$  和  $B$ ， $A$  的列数必须与  $B$  的行数相等，即公式中的  $n$ 。

**例 1.7** 以例 1.5 中的  $A$  和  $B$  为例

C=A\*B

C=

```
27.0000 + 5.0000i  10.0000 - 21.0000i  30.0000 + 7.0000i
11.0000 + 7.0000i  7.0000 - 5.0000i  14.0000
5.0000 + 22.0000i  20.0000 - 8.0000i  13.0000 + 9.0000i
```

4. “.\*”：数组乘积； $A.*B$  表示数组  $A$  和数组  $B$  的对应元素相乘； $A$  和  $B$  必须大小相同，或者其中之一为标量。

**例 1.8** 以例 1.5 中的  $A$  和  $B$  为例

D=A.\*B

D=

```
6.0000+2.0000i  -2.0000-6.0000i  5.0000-15.0000i
```

```
2.0000+6.0000i    5.0000+1.0000i    2.0000
7.0000+4.0000i    11.0000+3.0000i    13.0000+16.0000i
```

5. “/”：斜线或矩阵右除； $B/A$  近似等于  $B * \text{inv}(A)$ ；精确地表示： $B/A = (A' \setminus B)'$ 。

**例 1.9** 以例 1.5 中的 A 和 B 为例

```
B/A
ans=
0.4980-0.8078i    -0.5706+0.0843i    0.5569-0.5725i
0.9961+0.3843i    0.3588-2.3314i    0.1137+0.8549i
1.7137+0.3882i    -1.1392-0.8569i    0.3020+0.7412i
B * inv(A)
ans=
0.4980-0.8078i    -0.5706+0.0843i    0.5569-0.5725i
0.9961+0.3843i    0.3588-2.3314i    0.1137+0.8549i
1.7137+0.3882i    -1.1392-0.8569i    0.3020+0.7412i
```

6. “./”：数组右除； $A ./ B$  表示矩阵元素  $A(i,j)/B(i,j)$ ；A 和 B 必须大小相同，或者其中之一为标量。

**例 1.10** 以例 1.5 中的 A 和 B 为例

```
A/B
ans=
-0.2500+0.7500i    1.2000+0.4000i    0.5200+0.3600i
0.3000+0.1000i    0.0769+0.3846i    0-1.0000i
0.0769-0.6154i    -0.5385+0.6923i    0.7600-0.3200i
```

7. “\”：反斜线或左除；如果 A 为方阵， $A \setminus B$  近似等于  $\text{inv}(A) * B$ 。

**例 1.11** 以例 1.5 中的 A 和 B 为例

```
A \ B
ans=
0.8275-0.7569i    0.2353-1.3922i    0.1529+0.3451i
1.6392-0.9765i    -0.0686-1.1078i    1.3804+0.0549i
-0.7333+0.5333i    0.0000+0.3333i    0.4000-0.5333i
inv(A) * B
ans=
0.8275-0.7569i    0.2353-1.3922i    0.1529+0.3451i
1.6392-0.9765i    -0.0686-1.1078i    1.3804+0.0549i
```

```
-0.7333+0.5333i    0.0000+0.3333i    0.4000-0.5333i
```

8. “\” 数组左除;  $A \setminus B$  表示矩阵元素  $B(i,j)/A(i,j)$ ;  $A$  与  $B$  必须大小相同, 或者其中之一为标量。

**例 1.12** 以例 1.5 中的  $A$  和  $B$  为例

```
A \ B
```

```
ans =
```

```
-0.4000-1.2000i    0.7500-0.2500i    1.3000-0.9000i
 3.0000-1.0000i    0.5000-2.5000i    0+1.0000i
 0.2000+1.6000i   -0.7000-0.9000i    1.1176+0.4706i
```

9. “^”: 矩阵幂;  $X^p$ , 如果  $p$  为标量, 表示  $X$  的  $p$  次幂; 如果  $p$  为整数, 幂可由连续乘积运算得出; 如果  $p$  为非整数, 则先求  $X$  的逆; 对其它值  $p$ , 计算则包括特征值和特征向量; 如  $[V, D] = \text{eig}(X)$ , 则  $X^p = V * D.^p / V$ 。如果  $x$  是标量,  $P$  是矩阵,  $x^P$  用特征值和特征向量表示  $x$  的矩阵  $P$  次幂;  $X$  和  $P$  不能同为矩阵。

**例 1.13**

```
A =
```

```
1.0000+2.0000i    2.0000-2.0000i    3.0000-1.0000i
1.0000+1.0000i    1.0000+1.0000i    1.0000-1.0000i
2.0000-1.0000i    1.0000+3.0000i    4.0000+1.0000i
```

```
X = A ^ 2
```

```
X =
```

```
6.0000-1.0000i    16.0000+10.0000i    18.0000
      0+2.0000i    8.0000+4.0000i    11.0000-1.0000i
11.0000+5.0000i    1.0000+11.0000i    24.0000+5.0000i
```

```
X1 = A ^ 1.2
```

```
X1 =
```

```
0.7349+1.9777i    3.9269-1.9520i    4.5661-0.9693i
0.9731+1.5441i    1.2694+0.9305i    1.8785-1.3260i
3.2694-0.8008i    0.7677+4.2444i    5.5090+1.2545i
```

```
Z = 2 ^ A
```

```
Z =
```

```
12.0922+6.6195i    9.8240+17.2959i    32.0438+8.8338i
 4.9071+3.7569i    5.3101+10.8742i    16.0177+5.0157i
12.9320+9.3254i    1.0612+24.7096i    36.7043+22.8014i
```

```
Z1 = 1.2 ^ A
```

```
Z1 =
```

```

1.3452+0.3739i   0.6759- 0.1084i   1.0039- 0.1680i
0.2103+0.2208i   1.3402+ 0.3100i   0.4454- 0.1829i
0.6079-0.0618i   0.2326+ 0.8395i   2.3147+ 0.3519i
    
```

10. “^”：数组幂； $A.^B$  表示矩阵元素  $A(i,j)$  的  $B(i,j)$  次幂， $A$  与  $B$  必须大小相同，或者其中之一为标量。

**例 1.14** 以例 1.5 中的  $A$  和  $B$  为例

```

C=A.^B
C=
1.0e+002 *
    0.3765+0.2603i   -0.0057-0.0016i   0.0661+0.0571i
 -0.0064-0.0053i   -0.0125+0.1355i   0.0281-0.0132i
    0.0168+0.2002i    2.4463-3.4631i   0.6854-1.2045i
C1=A.^3
C1=
 -11.000- 2.0000i   -16.0000-16.0000i   18.0000-26.0000i
 - 2.0000+ 2.0000i   - 2.0000+ 2.0000i   -2.0000- 2.0000i
    2.0000-11.0000i   -26.0000-18.0000i   52.0000+47.0000i
C2=3.^A
C2=
 -1.7588+2.4304i   -5.2763-7.2911i   12.2805-24.0456i
    1.3645+2.6717i    1.3645+2.6717i    1.3645- 2.6717i
    4.0935-8.0152i   -2.9644-0.4609i   36.8414+72.1367i
    
```

11. “'”：矩阵转置； $A'$  表示矩阵  $A$  的线性代数转置。对于复矩阵，表示复共轭转置。

**例 1.15**

```

A=
1.0000+2.0000i   2.0000-2.0000i   3.0000-1.0000i
1.0000+1.0000i   1.0000+1.0000i   1.0000-1.0000i
2.0000-1.0000i   1.0000+3.0000i   4.0000+1.0000i
R=
    1    2    3
    4    3    5
    5    7    9
A1=A'
    
```

$A1=$



```

1.0000-2.0000i  1.0000-1.0000i  2.0000+1.0000i
2.0000+2.0000i  1.0000-1.0000i  1.0000-3.0000i
3.0000+1.0000i  1.0000+1.0000i  4.0000-1.0000i

```

```
R1=R'
```

```
R1=
```

```

1    4    5
2    3    7
3    5    9

```

12. “.’”: 数组转置或非共轭转置; 对于复矩阵, 不包括共轭。

**例 1.16** 以例 1.15 中的 A 和 R 为例

```
A2=A.'
```

```
A2=
```

```

1.0000+2.0000i  1.0000+1.0000i  2.0000-1.0000i
2.0000-2.0000i  1.0000+1.0000i  1.0000+3.0000i
3.0000-1.0000i  1.0000-1.0000i  4.0000+1.0000i

```

```
R2=R.'
```

```
R2=
```

```

1    4    5
2    3    7
3    5    9

```

13. `kron()`: Kronecker 张量积; `K=kron(A,B)` 返回 A 与 B 的 Kronecker 张量积; 如果 A 是  $m \times n$  矩阵, B 为  $p \times q$  矩阵, 则其结果为一个  $mp \times nq$  矩阵。

**例 1.17** 以例 1.15 中的 A 和 R 为例

```
K=kron(A,R)
```

```
K=
```

```
Columns 1 through 4
```

```

1.0000+ 2.0000i  2.0000+ 4.0000i  3.0000+ 6.0000i  2.0000- 2.0000i
4.0000+ 8.0000i  3.0000+ 6.0000i  5.0000+10.0000i  8.0000- 8.0000i
5.0000+10.0000i  7.0000+14.0000i  9.0000+18.0000i 10.0000-10.0000i
1.0000+ 1.0000i  2.0000+ 2.0000i  3.0000+ 3.0000i  1.0000+ 1.0000i
4.0000+ 4.0000i  3.0000+ 3.0000i  5.0000+ 5.0000i  4.0000+ 4.0000i
5.0000+ 5.0000i  7.0000+ 7.0000i  9.0000+ 9.0000i  5.0000+ 5.0000i
2.0000- 1.0000i  4.0000- 2.0000i  6.0000- 3.0000i  1.0000+ 3.0000i
8.0000- 4.0000i  6.0000- 3.0000i 10.0000- 5.0000i  4.0000+12.0000i
10.0000- 5.0000i 14.0000- 7.0000i 18.0000- 9.0000i  5.0000+15.0000i

```