

中国通信学会普通高等教育「十二五」规划教材立项项目

21世纪高等院校信息与通信工程规划教材
21st Century University Planned Textbooks of Information and Communication Engineering

通信原理 MATLAB 仿真教程

赵鸿图 茅艳 主编

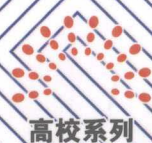
赵军良 苏玉娜 副主编

王俊峰 孙江峰 编著

Tutorial of Communication
Principles Simulation Using MATLAB



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

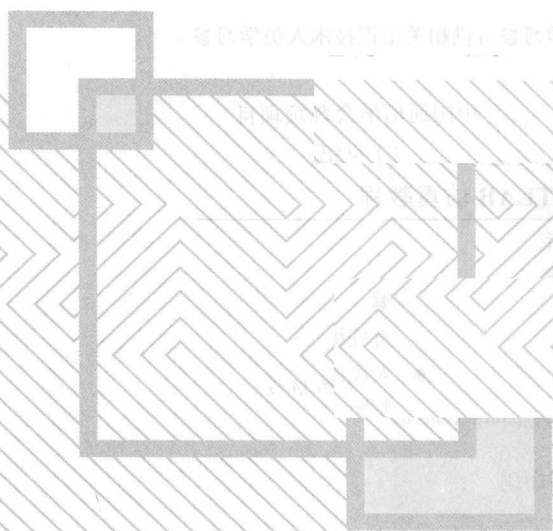


高校系列

中国通信学会普通高等教育「十二五」规划教材立项项目
21世纪高等院校信息与通信工程规划教材
21st Century University Planned Textbooks of Information and Communication Engineering

通信原理 MATLAB 仿真教程

赵鸿图 茅艳 主编
赵军良 苏玉娜 副主编
王俊峰 孙江峰 编著



人民邮电出版社
北京



图书在版编目 (C I P) 数据

通信原理MATLAB仿真教程 / 赵鸿图, 茅艳主编; 王俊峰, 孙江峰编著. — 北京: 人民邮电出版社, 2010. 11

21世纪高等院校信息与通信工程规划教材
ISBN 978-7-115-23288-5

I. ①通… II. ①赵… ②茅… ③王… ④孙… III. ①算法语言—应用—通信系统—系统仿真—软件包, MATLAB—高等学校—教材 IV. ①TN914

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第186894号

内 容 提 要

本书系统地介绍了通信原理 MATLAB 仿真的基本思想与方法, 重点讨论了 MATLAB 对常见信号与线性系统、模拟调制、模拟信号的数字传输、数字信号的基带传输、数字信号的频带传输、信道容量和编码以及扩频通信系统的仿真算法、流程与程序编制的思路过程。本书结构合理, 实例丰富, 叙述简明, 注重实践应用, 便于理解掌握。

本书可作为普通高等学校电气信息类专业本科生或研究生教材, 也可供相关工程技术人员学习参考。

中国通信学会普通高等教育“十二五”规划教材立项项目

21世纪高等院校信息与通信工程规划教材

通信原理 MATLAB 仿真教程

-
- ◆ 主 编 赵鸿图 茅 艳
 - 副 主 编 赵军良 苏玉娜
 - 编 著 王俊峰 孙江峰
 - 责任编辑 邹文波
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街14号
邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
大厂聚鑫印刷有限责任公司印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 19.25 2010年11月第1版
字数: 474千字 2010年11月河北第1次印刷

ISBN 978-7-115-23288-5

定价: 36.00 元

读者服务热线: (010)67170985 印装质量热线: (010)67129223

反盗版热线: (010)67171154

目 录

第 1 章 MATLAB 基本操作	1	第 3 章 MATLAB 绘图	45
1.1 运行环境介绍	1	3.1 二维数据曲线图的绘制	45
1.1.1 MATLAB 的运行方式	1	3.1.1 单根二维曲线的绘制	45
1.1.2 MATLAB 中的窗口	3	3.1.2 多根二维曲线的绘制	46
1.2 矩阵的生成	5	3.1.3 设置曲线样式	49
1.2.1 使用直接输入法建立矩阵	5	3.1.4 图形的标注与坐标控制	50
1.2.2 使用函数建立矩阵	6	3.1.5 图形窗口的分割	53
1.2.3 使用 M 文件建立矩阵	7	3.2 其他二维图形的绘制	54
1.3 基本运算	8	3.2.1 特殊坐标图形的绘制	54
1.3.1 算术运算	8	3.2.2 特殊二维图形的绘制	56
1.3.2 关系运算	11	3.3 图形用户界面设计	61
1.3.3 逻辑运算	12	3.3.1 图形用户界面介绍	61
1.4 基本函数	14	3.3.2 图形用户界面编程基础	63
1.4.1 常用数学函数的使用	14	3.4 案例分析	65
1.4.2 随机函数的使用	18	习题	67
1.5 符号运算	20	第 4 章 信号与系统的 MATLAB 仿真	68
1.5.1 符号表达式的生成	20	4.1 信号时域分析	68
1.5.2 符号表达式的计算	21	4.1.1 常用信号的 MATLAB 表示	68
习题	23	4.1.2 信号运算	77
第 2 章 M 文件程序设计	24	4.2 线性系统时域分析	87
2.1 M 文件	24	4.2.1 线性时(移)不变系统特性	87
2.1.1 M 文件概述	24	4.2.2 线性时(移)不变系统表示方法	87
2.1.2 M 文件的建立与打开	25	4.2.3 线性时(移)不变系统的时域响应	90
2.2 程序控制结构	26	4.3 信号与系统的频域分析	94
2.2.1 顺序结构	26	4.3.1 信号的傅里叶分析	94
2.2.2 选择结构	28	4.3.2 连续时间系统的 S 域分析	103
2.2.3 循环结构	32	4.3.3 离散时间系统的 Z 域分析	107
2.3 函数文件	37	4.4 案例分析	111
2.3.1 函数文件的基本结构	37	习题	118
2.3.2 函数调用	38	第 5 章 模拟调制	120
2.3.3 全局变量与局部变量	40	5.1 幅度调制	120
2.4 案例分析	40		
习题	43		

5.1.1 标准调幅	120	第 8 章 数字信号的频带传输	227
5.1.2 抑制载波双边带调幅	126	8.1 二进制数字调制	227
5.1.3 单边带调幅	128	8.1.1 二进制数字幅度调制	227
5.1.4 残留边带调幅	131	8.1.2 二进制数字频率调制	231
5.1.5 幅度调制的解调	133	8.1.3 二进制数字相位调制	237
5.2 角度调制	139	8.2 多进制数字调制	241
5.2.1 调频	139	8.2.1 多进制数字幅度调制	242
5.2.2 调相	147	(MASK)	242
5.2.3 解调	148	8.2.2 多进制数字频率调制	246
5.3 案例分析	152	(MFSK)	246
习题	154	8.2.3 多进制数字相位调制	249
第 6 章 模拟信号的数字传输	156	(MPSK)	249
6.1 抽样定理	157	8.3 案例分析	254
6.1.1 低通抽样	157	习题	258
6.1.2 带通抽样	161	第 9 章 信道容量和编码	260
6.2 量化	163	9.1 分组码	260
6.2.1 均匀量化	164	9.1.1 分组码简介	260
6.2.2 非均匀量化	166	9.1.2 分组码工具箱介绍	264
6.3 编码调制	176	9.2 卷积码	268
6.3.1 脉冲编码调制	176	9.2.1 卷积码编码器的描述	268
6.3.2 差分脉冲编码调制 (DPCM)	187	9.2.2 卷积码的编码与译码	270
系统	187	9.3 案例分析	273
6.3.3 增量调制 (ΔM)	189	习题	275
6.4 案例分析	196	第 10 章 扩频通信系统	276
习题	199	10.1 直接序列扩频通信	277
第 7 章 数字信号的基带传输	200	10.1.1 直扩系统的组成及工作	277
7.1 数字基带信号的码型	200	原理	277
7.1.1 常用码型	200	10.1.2 直扩系统的调制方式	278
7.1.2 码型的功率谱分布	206	10.1.3 直扩信号的解扩	279
7.1.3 基带传输的误码率	210	10.1.4 干扰容限	280
7.2 码间串扰	212	10.2 扩频码的生成及特性	280
7.2.1 无码间串扰的基带传输	212	10.2.1 m 序列	281
特性	212	10.2.2 m 序列的 MATLAB 仿真	282
7.2.2 眼图	214	10.2.3 Gold 序列	286
7.3 均衡技术	216	10.2.4 跳频序列	286
7.4 部分响应	218	10.3 跳频通信系统原理	287
7.5 案例分析	223	10.4 案例分析	290
习题	226	习题	297
		附录 本书调用的函数	298

交互式命令。详细知识请参考附录 A。本文档中所有命令均在 MATLAB 7.0 版本下测试通过。如有疑问，请联系作者。作者邮箱：zhangyong@163.com。作者地址：北京市海淀区中关村大街 22 号。作者电话：010-62595836。作者邮编：100080。

第 1 章 MATLAB 基本操作

MATLAB 原为矩阵实验室的意思，其基本处理对象就是矩阵，而且 MATLAB 大部分运算或命令都是以（复）矩阵为基本单元进行的。因此，MATLAB 中矩阵的运算功能可以说十分全面和强大，学习 MATLAB 也要从学习 MATLAB 的矩阵运算和运算功能开始。下面我们首先来了解一下 MATLAB 的运行环境。

1.1 运行环境介绍

1.1.1 MATLAB 的运行方式

MATLAB 提供了两种运行方式，即命令行方式和 M 文件方式。两种运行方式各有特点，下面分别介绍。

1. 命令行运行方式

可以通过直接在命令窗口输入命令行来实现计算或作图功能。例如，要求矩阵 A 和 B 的和，其中

$$A = \begin{bmatrix} 2 & 5 \\ 6 & 3 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} -7 & 9 \\ -2 & 0 \end{bmatrix}$$

首先打开 MATLAB 界面，如图 1-1 所示。

在命令窗口中输入下面的命令行：

```
A=[2 5;6 3];
B=[-7 9;-2 0];
C=A+B
```

最终显示：

C =

```
-5    14
 4     3
```

2. M 文件运行方式

在 MATLAB 窗口中单击 File 菜单，然后依次选择 New→M-File 命令，打开 M 文件输入

2 | 通信原理 MATLAB 仿真教程

运行界面，如图 1-2 所示。在该窗口中输入程序文件，可以进行调试或运行。与命令行方式相比，M 文件方式的优点是可调试，可重复应用。

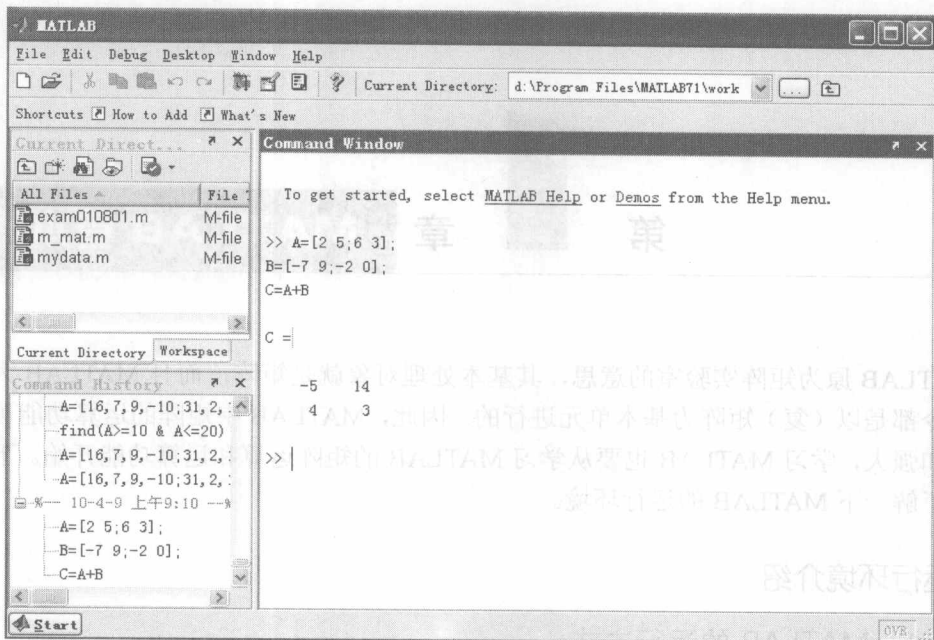


图 1-1 MATLAB 界面

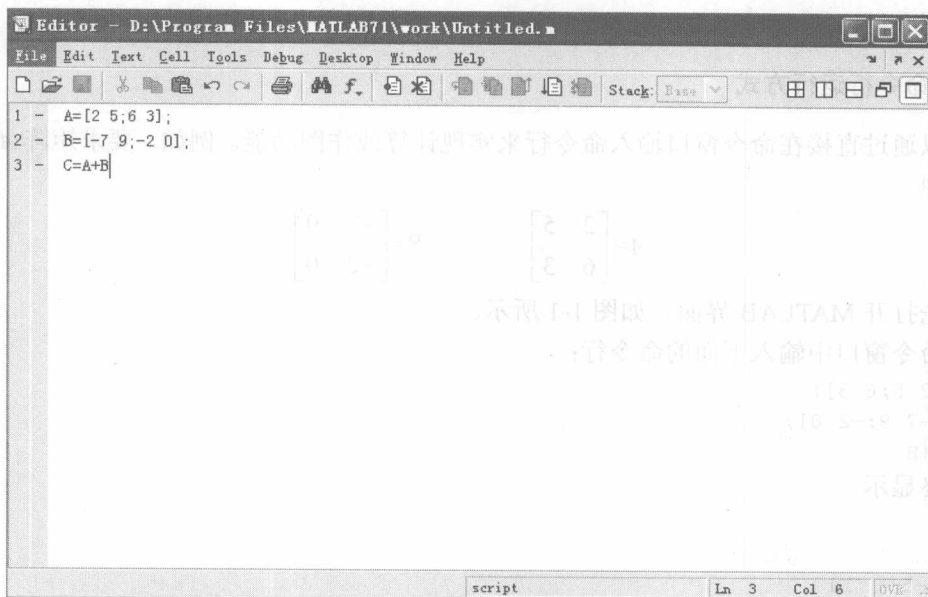


图 1-2 M 文件输入运行界面

对于前面的矩阵求和问题，在 M 文件输入运行界面中输入程序，如图 1-2 所示。然后在 Debug 菜单中选择 Run 选项，将在命令窗口输出矩阵 $A+B=C$ 的值。

1.1.2 MATLAB 中的窗口

MATLAB 中常见的窗口有命令窗口、M 文件窗口、当前目录窗口、工作空间窗口、命令历史窗口、GUI 制作窗口等。

1. 命令窗口

命令窗口如图 1-1 中右侧窗口所示。在该窗口中可以输入命令行，实现计算或绘图功能。命令窗口中有一些常用的功能键，利用它们可以使操作更简便快捷。常见的功能键如表 1-1 所示。

表 1-1 命令窗口常用功能键

功 能 键	功 能	功 能 键	功 能
↑, Ctrl+P	重新调入上一行命令	Home, Ctrl+A	光标移到行首
↓, Ctrl+N	重新调入下一行命令	End, Ctrl+E	光标移到行尾
←, Ctrl+B	光标左移一个字符	Esc	清除命令行
→, Ctrl+F	光标右移一个字符	Del, Ctrl+D	删除光标处字符
Ctrl+←	光标左移一个字	Backspace	删除光标左边字符
Ctrl+→	光标右移一个字	Ctrl+K	删除至行尾

2. M 文件窗口

M 文件窗口如图 1-2 所示。利用 Edit 菜单中的选项，可以对 M 文件进行编辑；利用 Debug 菜单中的选项，可以进行调试，可以设置和取消断点，可以确定运行方式，如逐行运行、运行至光标处等，单击 Run 选项，进行运行。

3. 当前目录窗口

当前目录窗口如图 1-3 所示，该窗口中显示当前目录下所有文件的文件名、文件类型和最后修改时间。

4. 工作空间窗口

工作空间窗口中列出数据的变量信息，包括变量名、变量数组大小、变量字节大小和变量类型，如图 1-4 所示。

5. 命令历史窗口

命令历史窗口如图 1-5 所示，它显示命令窗口中所有执行过的命令。利用该窗口，一方面可以查看曾经执行过的命令；另一方面，可以重复利用原来输入的命令。可以从命令历史窗口中直接通过双击某个命令来执行该命令，也可以通过拖拉或复制操作，将命令行复制到命令窗口后再执行。

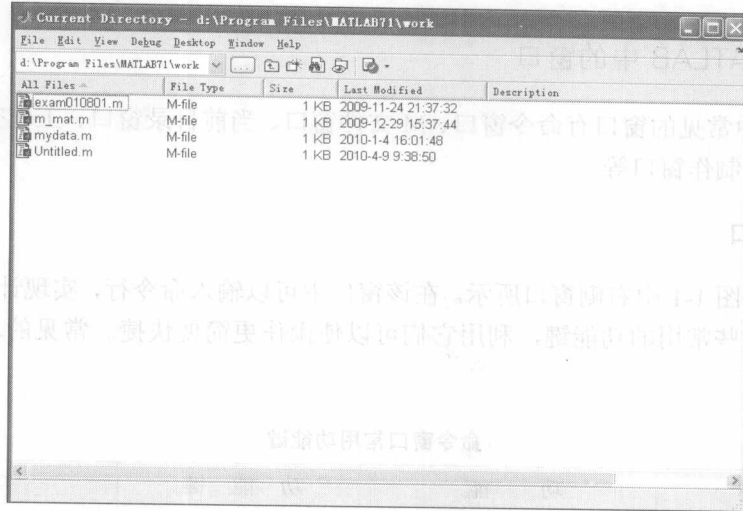


图 1-3 当前目录窗口

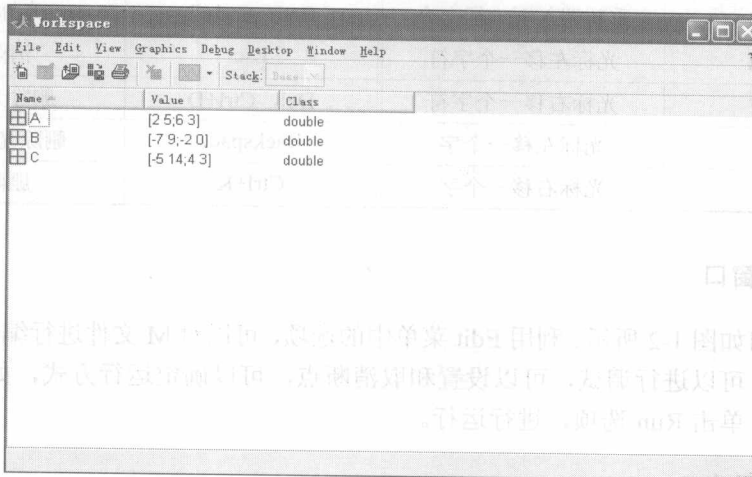


图 1-4 工作空间窗口

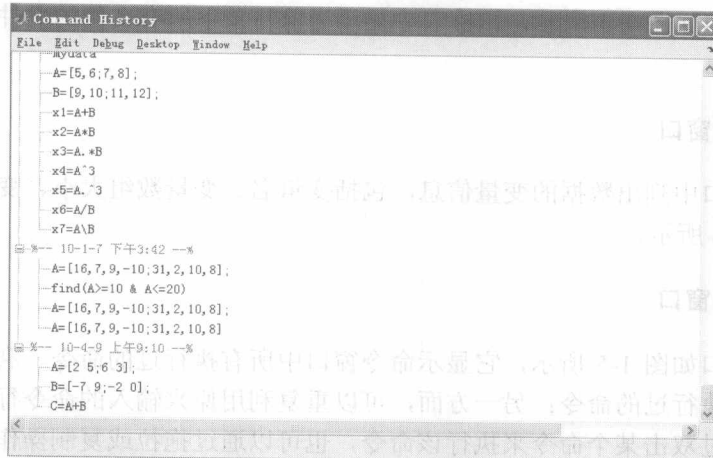


图 1-5 命令历史窗口

6. GUI 制作窗口

在 File 菜单下选择 New 次级菜单中的 GUI 选项, 打开图形用户界面制作窗口, 如图 1-6 所示。利用窗口左侧工具栏中的按钮, 可以在右侧窗口中绘出按钮、单选钮、滚动条、文本框、列表框、坐标系统等多个控件。就像在 Visual Basic 和 Visual C++ 程序设计软件中所做的一样, 因而能够快速、方便地实现面向对象编程, 生成操作友好的图形用户界面程序。

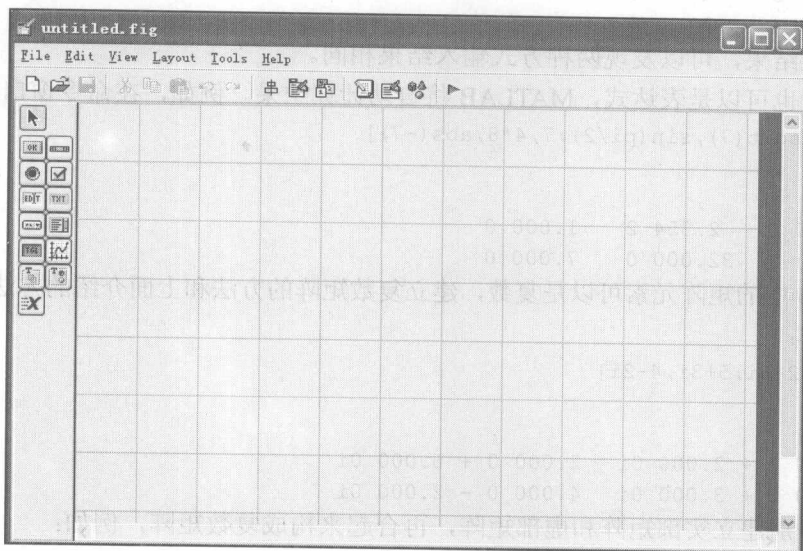


图 1-6 图形用户界面 (GUI) 制作窗口

1.2 矩阵的生成

MATLAB 语言中, 矩阵主要分为 3 类: 数值矩阵、符号矩阵和特殊矩阵, 其中数值矩阵有实数数值矩阵和复数数值矩阵两种。生成不同矩阵的方法并不完全相同, 下面介绍 3 种建立矩阵的方法。

1.2.1 使用直接输入法建立矩阵

MATLAB 语言强大的功能之一是能直接处理矩阵, 当然首要任务是输入待处理的矩阵。最简单的建立矩阵的方法是从键盘直接输入矩阵的元素, 同一行的各个元素之间用空格或逗号来分隔, 空格个数不限, 不同行用分号分隔或者分行输入, 所有元素置于一对方括号 ([]) 内。例如, 在命令窗口中输入以下指令:

```
A=[1,2,3,4;2,3,4,5;3,4,5,6]
```

则: A=

```
1 2 3 4
2 3 4 5
3 4 5 6
```

这样, 在 MATLAB 的工作空间中就建立了一个矩阵 A, 以后就可以使用矩阵 A。在输

入矩阵的元素时，也可以分成几行输入，用回车键代替分号，具体指令如下：

```
A=[1 2 3 4
    2 3 4 5
    3 4 5 6]
```

则：A =

```
1 2 3 4
2 3 4 5
3 4 5 6
```

比较两次结果，可以发现两种方式输入结果相同。

矩阵元素也可以是表达式，MATLAB 将自动计算结果。例如，在命令窗口输入：

```
B=[10,5-sqrt(7),sin(pi/2);7,4*8,abs(-7)]
```

则：B =

```
10.000 0 2.354 2 1.000 0
7.000 0 32.000 0 7.000 0
```

MATLAB 中的矩阵元素可以是复数，建立复数矩阵的方法和上面介绍的方法相同。例如，建立复数矩阵：

```
B=[3+2i,2+6i;5+3i,4-2i]
```

则：B =

```
3.000 0 + 2.000 0i 2.000 0 + 6.000 0i
5.000 0 + 3.000 0i 4.000 0 - 2.000 0i
```

也可以分别建立实部矩阵和虚部矩阵，再合起来构成复数矩阵，例如：

```
BR=[3,2;5,4]; BI=[2,2;3,-2];
```

```
B=BR+BI*i
```

则：B =

```
3.000 0 + 2.000 0i 2.000 0 + 2.000 0i
5.000 0 + 3.000 0i 4.000 0 - 2.000 0i
```

由复数矩阵这种生成方法可以看出 MATLAB 指令对数组元素“并行操作”的实质。

1.2.2 使用函数建立矩阵

MATLAB 提供了生成和操作矩阵的函数，可以利用它们建立矩阵。

(1) 利用 reshape 函数建立数值矩阵

在命令窗口中输入以下指令：

```
a=1:9;
b=reshape(a,3,3)
```

则：b =

```
1 4 7
2 5 8
3 6 9
```

这里产生了 9 个元素的行向量 a，然后将行向量改成了 3×3 矩阵 b=[1,4,7;2,5,8;3,6,9]。

(2) 利用 diag 函数建立对角矩阵

在命令窗输入以下指令：


```
A=rand(4,4)
```

则: A=

```
0.9501 0.8913 0.8214 0.9218
0.2311 0.7621 0.4447 0.7382
0.6068 0.4565 0.6154 0.1763
0.4860 0.0185 0.7919 0.4057
```

```
B=diag(A)
```

则: B=

```
0.9501
0.7621
0.6154
0.4057
```

```
C=diag(B)
```

则: C=

```
0.9501 0 0 0
0 0.7621 0 0
0 0 0.6154 0
0 0 0 0.4057
```

本例首先使用 `rand` 函数生成 4×4 矩阵 A , 然后利用矩阵 A 的主对角线元素建立矩阵 B , 并利用矩阵 B 中元素构建对角矩阵 C 。

1.2.3 使用 M 文件建立矩阵

对于较大且比较复杂的矩阵, 可以通过建立一个 M 文件的方式创建。M 文件是一种可以在 MATLAB 环境下运行的文本文件。它可以分为命令式文件和函数式文件两种。这里主要使用命令式文件, 用它的最简单形式建立大型矩阵。下面通过一个简单的例子来说明如何利用 M 文件创建矩阵。

【例 1-1】 利用 M 文件建立 `mdata` 矩阵。

解: 启动有关文本编辑程序或 MATLAB 的 M-file 编辑器, 在 M 文件中输入以下指令。

```
mdata=[1.1 1.2 1.3 1.4 1.5 1.6 1.7 1.8 1.9
        2.1 2.2 2.3 2.4 2.5 2.6 2.7 2.8 2.9
        3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 3.6 3.7 3.8 3.9
        4.1 4.2 4.3 4.4 4.5 4.6 4.7 4.8 4.9]
```

输入完成后把 M 文件存盘, 文件名设为 `m_mat.m`。

接下来在 MATLAB 命令窗口中输入 `m_mat`, 即刻运行 M 文件, 就会自动建立一个名为 `mdata` 的矩阵, 可供以后使用。

则: `mdata =`

```
1.1000 1.2000 1.3000 1.4000 1.5000 1.6000 1.7000
1.8000 1.9000
2.1000 2.2000 2.3000 2.4000 2.5000 2.6000 2.7000
2.8000 2.9000
3.1000 3.2000 3.3000 3.4000 3.5000 3.6000 3.7000
3.8000 3.9000
```

```

4.100 0    4.200 0    4.300 0    4.400 0    4.500 0    4.600 0    4.700 0
4.800 0    4.900 0

```

1.3 基本运算

1.3.1 算术运算

MATLAB 的基本算术运算有+ (加)、- (减)、* (乘)、/ (右除)、\ (左除)、^ (乘方)。这些算术运算符的运算规则不难理解,但必须注意,所有这些运算是在矩阵意义下进行的,单个数据的算术运算只是一种特例。

1. 矩阵的加减运算

假定有两个矩阵 A 和 B,则可以由 A+B 和 A-B 实现矩阵的加减运算。运算规则是: A 和 B 矩阵的维数相同,则可以执行矩阵的加减运算, A 和 B 的对应元素相加减;如果 A 与 B 的维数不相同,则 MATLAB 将给出错误信息,提示用户两个矩阵的维数不匹配。

【例 1-2】 A=[1,2;3,4], B=[5,6;7,8], 求 x1=A+B, x2=A-B。

解: 在 MATLAB 命令窗口键入以下命令。

```
A=[1,2;3,4];
```

```
B=[5,6;7,8];
```

```
x1=A+B
```

```
x2=A-B
```

则: x1 =

```

     6     8
    10    12
x2 =
    -4    -4
    -4    -4

```

一个标量也可以和其他不同维数的矩阵进行加减运算。例如:

```
x=[3,0,-1;2,7,4];
```

```
y=x-1;
```

```
y=y+x
```

则: y =

```

     5    -1    -3
     3    13     7

```

2. 矩阵乘法

假定有两个矩阵 A 和 B,若 A 为 m×n 矩阵, B 为 n×p 矩阵,则 C=A·B 为 m×p 矩阵,其各个元素为

$$c_{ij} = \sum_{k=1}^n a_{ik} \cdot b_{kj} \quad (i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,p)$$

例如:

```
A=[2,5,7;1,3,6;3,2,5];
B=[1,3,5;2,4,6;5,6,7];
c1=A*B
c1 =
```

```
则:      47    68    89
          37    51    65
          32    47    62
```

```
c2=B*A
则:      c2 =
```

```
      20    24    50
      26    34    68
      37    57   106
```

可见, $A \cdot B \neq B \cdot A$, 即对矩阵乘法运算而言, 交换律不成立。

矩阵 A 和 B 进行乘法运算, 要求 A 的列数和 B 的行数相等, 此时称 A、B 矩阵是可乘的, 或称 A 和 B 两矩阵维数相容。如果两者的维数不相容, 则将给出错误信息, 提示用户两个矩阵是不可乘的。例如:

```
A=[2,2;1,1;3,3];
B=A*A
```

```
??? Error using ==> mtimes
Inner matrix dimensions must agree.
```

说明矩阵维数不符合要求, 不能进行乘法运算。

在 MATLAB 中, 还可以进行矩阵和标量相乘, 标量可以是乘数, 也可以是被乘数。矩阵和标量相乘是矩阵中的每个元素与此标量相乘。

3. 矩阵除法

在 MATLAB 中, 有两种矩阵除法运算: \ 和 /, 分别表示左除和右除。如果 A 矩阵是非奇异阵, 则 A\B 和 B/A 运算可以实现。A\B 等效于 A 的逆左乘 B 矩阵, 也就是 $\text{inv}(A) \cdot B$, 而 B/A 等效于 A 矩阵的逆右乘 B 矩阵, 也就是 $B \cdot \text{inv}(A)$ 。

对于含有标量的运算, 两种除法运算的结果相同, 如 $1/2$ 和 $2 \setminus 1$ 所得的值相等, 都等于 2。又设 $a = [5, 10]$, 则 $a/5 = 5 \setminus a = [1, 2]$ 。对于矩阵来说, 左除和右除表示两种不同的除数矩阵和被除数矩阵的关系。对于矩阵运算, 一般 $A \setminus B \neq B/A$ 。例如:

```
a=[11,5,3;78,5,21;7,15,9];
b=[20,30,40;30,40,50;40,50,60];
c1=a\b
```

```
则: c1 =
```

```
    0.769 2    1.538 5    2.307 7
    3.692 3    5.717 9    7.743 6
   -2.307 7   -5.170 9   -8.034 2
```

```
c2=b/a
```

```
则: c2 =
```

```
   -9.978 6    1.222 2    4.918 8
  -11.303 4    1.444 4    5.953 0
  -12.628 2    1.666 7    6.987 2
```

4. 矩阵的乘方

一个矩阵的乘方运算可以表示成 A^x ，要求 A 为方阵， x 为标量。例如：

```
A=[3,0,7;9,12,8;1,5,3];
A^3
```

则：ans =

```
    405    630    518
   226 8    312 3    302 2
    884    118 0    112 5
```

矩阵的开方运算是相当困难的，但是借助于计算机可以很方便地求出一个矩阵的方根，例如：

```
A=[3,0,7;9,12,8;1,5,3];
```

```
A^0.5
```

则：ans =

```
 2.002 4 + 0.000 0i  -0.372 3 + 0.000 0i  2.050 0 - 0.000 0i
 1.689 1 - 0.000 0i  3.425 6 - 0.000 0i  0.907 0
-0.185 8 + 0.000 0i  0.985 7 - 0.000 0i  1.577 0 + 0.000 0i
```

5. 点运算

在 MATLAB 中有一种特殊的运算，因为其运算符是在有关算术运算符前面加点，所以叫点运算。点运算有 $.*$ 、 $./$ 、 $.\$ 和 $.^$ 。两矩阵进行点运算是指它们的对应元素进行相关运算，要求两矩阵的维参数相同。例如：

```
A=[1,3,5;2,4,6;3,6,9];
```

```
B=[9,10,7;6,9,4;2,5,8];
```

```
C=A.*B
```

则：C =

```
    9    30    35
   12    36    24
    6    30    72
```

$A.*B$ 表示 A 和 B 单个元素之间对应相乘，显然与 $A*B$ 结果不同。

如果 A 、 B 两矩阵具有相同的维数，则 $A./B$ 表示 A 矩阵除以 B 矩阵的对应元素。 $B.\A$ 等价于 $A./B$ 。例如：

```
m=[12,24,18;3,6,9];
```

```
n=[-2,-3,6;6,36,27];
```

```
z1=m./n
```

则：z1 =

```
-6.000 0  -8.000 0   3.000 0
 0.500 0   0.166 7   0.333 3
```

```
z2=n.\m
```

则：z2 =

```
-6.000 0  -8.000 0   3.000 0
 0.500 0   0.166 7   0.333 3
```