

中国通信学会普通高等教育「十一五」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

邮电
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

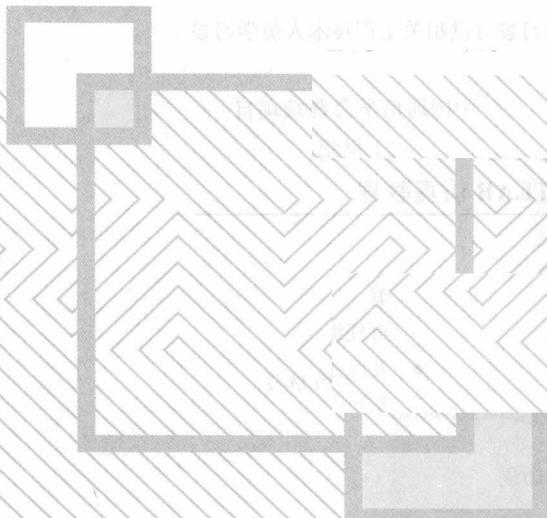
王俊峰

孙江峰

编著

内容简介

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材《通信原理》的配套教材。全书共分10章，主要内容包括：通信系统的基本概念、信源与信宿、信道、信道容量、信道编码、信道解码、调制与解调、多路复用与多址技术、通信协议与标准、现代通信技术等。每章都配有MATLAB仿真实验，通过实验加深对理论知识的理解。本书可作为通信类专业的教材，也可供相关工程技术人员参考。



人民邮电出版社
北京



高校系列

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等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

本书是融合了 MATLAB 语言与通信理论的教材，内容丰富且全面。全书共分 10 章，第 1 章为 MATLAB 基础知识；第 2 章为 MATLAB 的 M 文件设计；第 3 章为 MATLAB 绘图；第 4 章为信号与系统的 MATLAB 仿真；第 5 章为模拟调制；第 6 章为模拟信号的数字传输；第 7 章为数字信号的基带传输；第 8 章为数字信号的频带传输；第 9 章为信道容量和编码；第 10 章为扩频通信系统。书中每章都配有大量的例题和习题，帮助读者更好地理解和掌握 MATLAB 在通信领域的应用。

前言

前言

MATLAB 是目前国际上流行的进行科学研究、工程计算的软件。它起源于矩阵运算，并已经发展成为一种高度集成的计算机语言。MATLAB 具有强大的数学运算能力、方便实用的绘图功能及语言的高度集成性。除具备卓越的数值计算能力之外，它还提供了专业水平的符号计算、文字处理、可视化建模仿真、实时控制等功能。MATLAB 的基本数据单位是矩阵，它的指令表达式与数学工程中常用的表达式十分相似，因此用 MATLAB 来解决运算问题要比用 C、Fortran 等语言完成相同的事情方便得多。可以预见，在科学运算、自动控制、科学绘图、通信仿真等领域，MATLAB 语言将长期保持其独一无二的地位。

在通信领域 MATLAB 更是优势明显，因为通信领域中很多问题是研究系统性能的，传统的方法只有构建一个实验系统，采用各种方法进行测量，才能得到所需的数据，这样不仅需要花费大量的资金用于实验系统的构建，而且系统构建周期长，系统参数的调整也十分困难。而 MATLAB 的出现使得通信系统的仿真能够用计算机模拟实现，免去构建实验系统的不便，而且操作十分简便，只需要输入不同的参数就能得到不同情况下系统的性能，而且在结构的观测和数据的存储方面也比传统的方式有很多优势。因而 MATLAB 在通信仿真领域得到越来越多的应用。

本书可用作《通信原理》或其他通信系统方面的理论教科书的参考书或补充教材。本书的特点是由浅入深，从基本的 MATLAB 操作讲起，即使读者以前没有接触过 MATLAB，也能在本书的引导下一步一步从基本的 MATLAB 操作开始，逐渐掌握 MATLAB 的通信系统仿真。

本书的特色是首先介绍通信原理的基本理论，然后以实例说明算法转化为流程，再到程序的思想过程，让读者学会处理具体问题的建模编程方法。本书共分为 10 章。第 1 章为 MATLAB 的基本操作，简要介绍 MATLAB 的基本知识；第 2 章为 M 文件程序设计，介绍 M 文件的编制；第 3 章为 MATLAB 绘图，介绍 MATLAB 的常用绘图命令与菜单操作；第 4 章为信号与系统的 MATLAB 仿真，介绍常用信号的 MATLAB 建模与仿真方法；第 5 章为模拟调制；第 6 章为模拟信号的数字传输；第 7 章为数字信号的基带传输；第 8 章为数字信号的频带传输；第 9 章为信道容量和编码；第 10 章为扩频通信系统。在这些章节中，不仅讲述了通信原理中涉及的基本理论，而且通过实例来演绎和深化 MATLAB 编程仿真的基本思想与算法流程，理论联系实际，并在重要概念上作适当延伸。

本书由河南理工大学赵鸿图、茅艳任主编，赵军良、苏玉娜任副主编。具体编写分工

2 | 通信原理 MATLAB 仿真教程

如下：赵鸿图编写第 5 章、第 6 章、第 9 章，茅艳编写第 1 章、第 3 章，赵军良编写第 2 章，王俊峰编写第 4 章，苏玉娜编写第 7 章、第 8 章，孙江峰编写第 10 章。全书由赵鸿图、茅艳统稿并定稿。在本书的编写过程中，燕景、刘平、席冬梅、庞小澎、刘坤进行了部分内容的文字输入和绘图工作，在此表示感谢。

本书可作为高等院校通信工程、信息工程、电子工程等专业本科生相关课程的参考书和补充教材，也可供相关工程技术人员和科研人员学习参考。

由于编写时间仓促，书中难免有疏漏之处，希望广大读者批评指正。

编 者

2010 年 9 月

感谢所有对本书编写工作给予支持的学者、专家和同行。特别感谢赵鸿图、茅艳、王俊峰、苏玉娜、孙江峰、赵军良、燕景、刘平、席冬梅、庞小澎、刘坤等老师和同学，他们的辛勤付出和无私奉献使本书得以顺利出版。同时也要感谢机械工业出版社的编辑们，他们对本书给予了极大的支持和帮助。在此向他们表示衷心的感谢！

本书是“十二五”规划教材《通信原理》的配套教材，是根据该教材的内容和特点编写的。全书共分 8 章，每章由理论知识、典型例题与习题组成。每章前面有引言，每节前面有学习目标，每节后面有小结，每章后面有本章小结。每节例题与习题部分包括了该节的主要内容，每节习题部分则提供了大量的练习题，以帮助读者更好地掌握所学的知识。每章最后还附有思考题和习题，以进一步巩固所学的内容。

本书在编写过程中参考了国内外许多优秀教材和资料，同时也结合了作者多年从事通信原理教学和研究工作的经验。在编写过程中，我们力求做到深入浅出、通俗易懂，同时又不失科学性和系统性。希望本书能够满足广大读者的需求，为通信专业的学习者提供一个良好的学习平台。

由于时间仓促，书中难免有疏漏之处，敬请广大读者批评指正。同时，我们也会根据读者的意见和建议，不断改进和完善本书的内容。

最后，感谢机械工业出版社的编辑们对本书的支持和帮助，同时也感谢所有参与本书编写工作的同事们。希望本书能够成为广大读者学习通信原理的一本好书。

目 录

第1章 MATLAB 基本操作	1
1.1 运行环境介绍	1
1.1.1 MATLAB 的运行方式	1
1.1.2 MATLAB 中的窗口	3
1.2 矩阵的生成	5
1.2.1 使用直接输入法建立矩阵	5
1.2.2 使用函数建立矩阵	6
1.2.3 使用 M 文件建立矩阵	7
1.3 基本运算	8
1.3.1 算术运算	8
1.3.2 关系运算	11
1.3.3 逻辑运算	12
1.4 基本函数	14
1.4.1 常用数学函数的使用	14
1.4.2 随机函数的使用	18
1.5 符号运算	20
1.5.1 符号表达式的生成	20
1.5.2 符号表达式的计算	21
习题	23
第2章 M 文件程序设计	24
2.1 M 文件	24
2.1.1 M 文件概述	24
2.1.2 M 文件的建立与打开	25
2.2 程序控制结构	26
2.2.1 顺序结构	26
2.2.2 选择结构	28
2.2.3 循环结构	32
2.3 函数文件	37
2.3.1 函数文件的基本结构	37
2.3.2 函数调用	38
2.3.3 全局变量与局部变量	40
2.4 案例分析	40
习题	43

第3章 MATLAB 绘图

3.1 二维数据曲线图的绘制	45
3.1.1 单根二维曲线的绘制	45
3.1.2 多根二维曲线的绘制	46
3.1.3 设置曲线样式	49
3.1.4 图形的标注与坐标控制	50
3.1.5 图形窗口的分割	53
3.2 其他二维图形的绘制	54
3.2.1 特殊坐标图形的绘制	54
3.2.2 特殊二维图形的绘制	56
3.3 图形用户界面设计	61
3.3.1 图形用户界面介绍	61
3.3.2 图形用户界面编程基础	63
3.4 案例分析	65
习题	67

第4章 信号与系统的 MATLAB 仿真

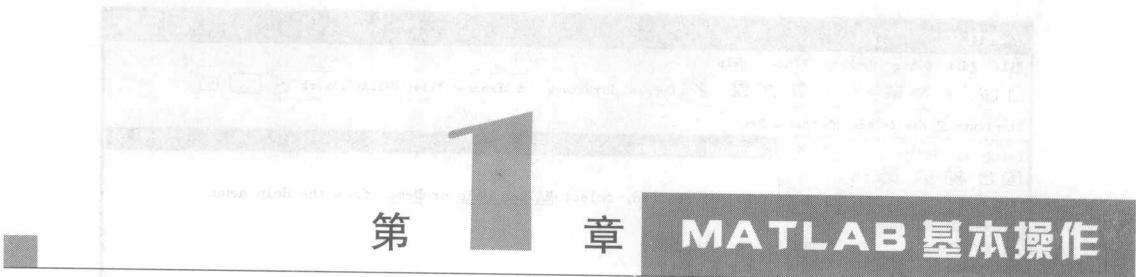
4.1 信号时域分析	68
4.1.1 常用信号的 MATLAB 表示	68
4.1.2 信号运算	77
4.2 线性系统时域分析	87
4.2.1 线性时(移)不变系统特性	87
4.2.2 线性时(移)不变系统表示方法	87
4.2.3 线性时(移)不变系统的时域响应	90
4.3 信号与系统的频域分析	94
4.3.1 信号的傅里叶分析	94
4.3.2 连续时间系统的 S 域分析	103
4.3.3 离散时间系统的 Z 域分析	107
4.4 案例分析	111
习题	118

第5章 模拟调制

5.1 幅度调制	120
----------	-----

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

五类命令语言。语言集为脚本语言、文本字符串中包含表达式、下标寻址、函数调用、由函数重载、局部和全局的面向对象类组成。



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

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。

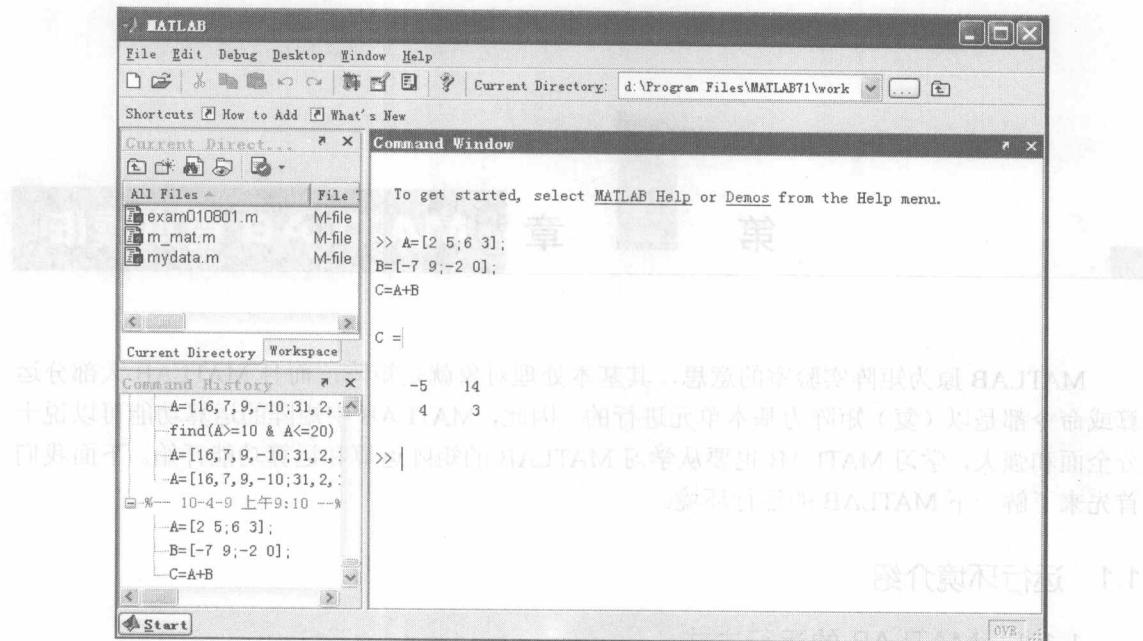


图 1-1 MATLAB 界面

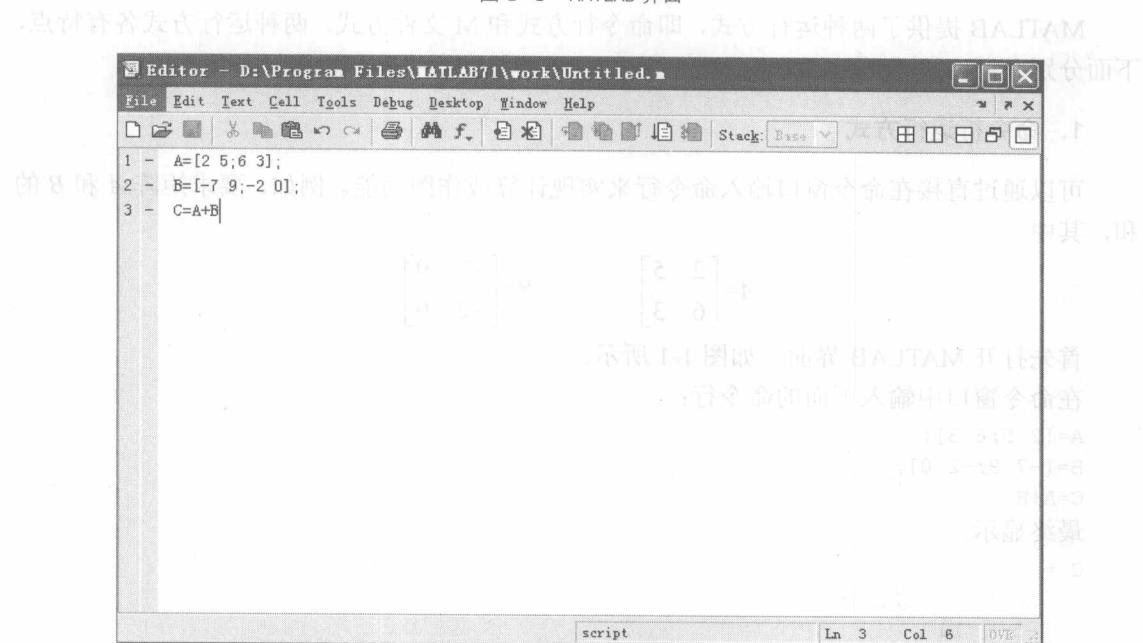


图 1-2 M 文件输入运行界面

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行。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。

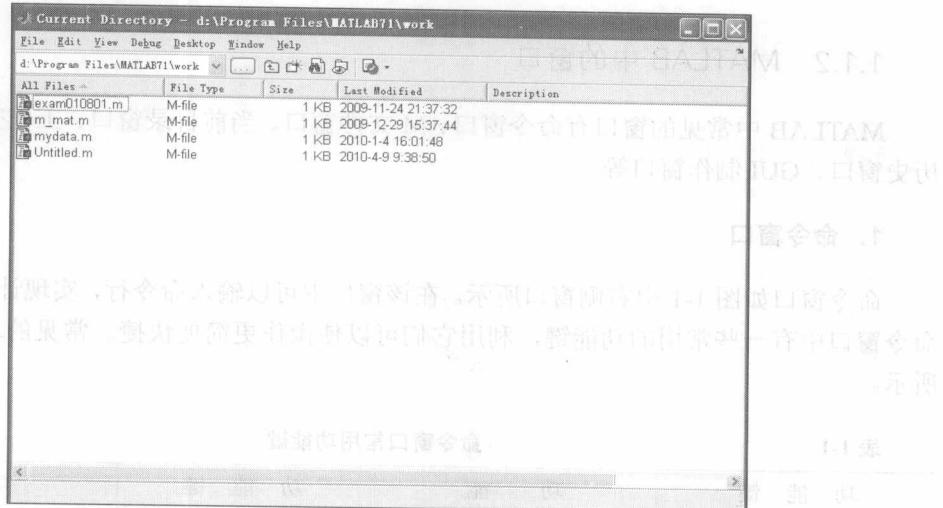


图 1-3 当前目录窗口

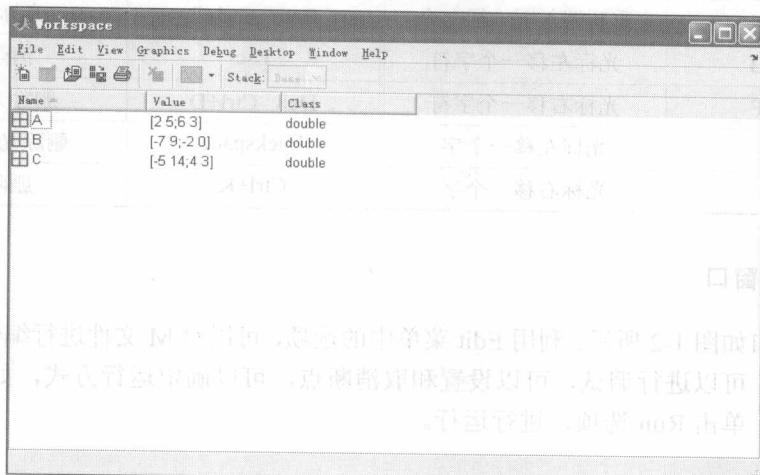


图 1-4 工作空间窗口

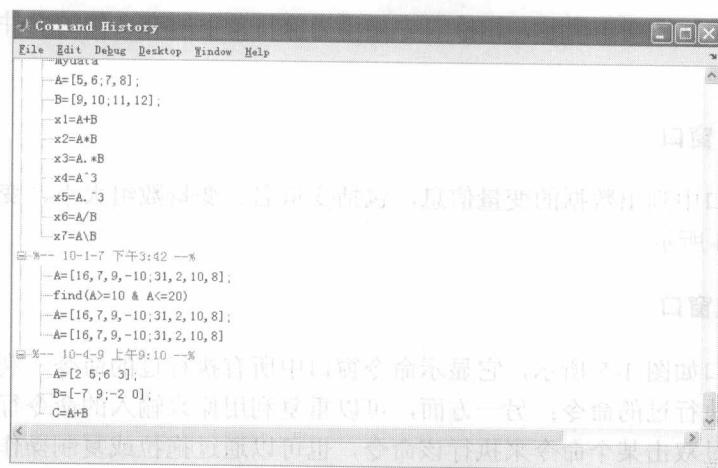


图 1-5 命令历史窗口

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。

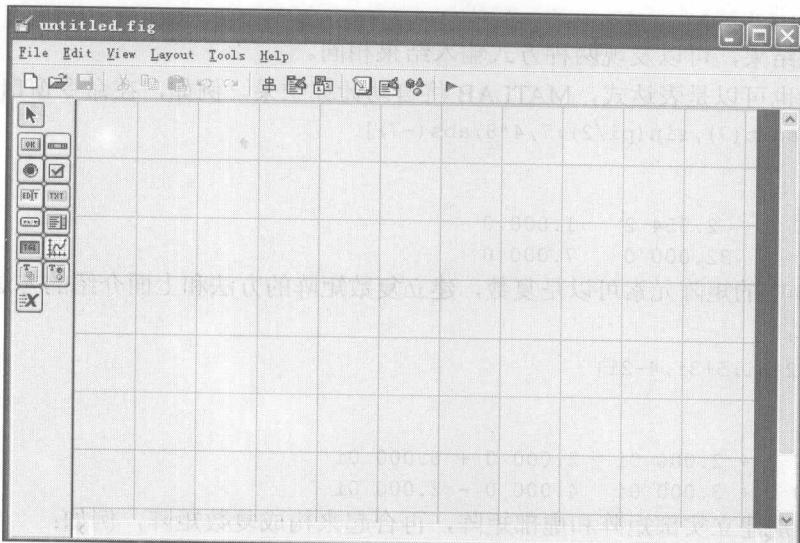


图 1-6 图形用户界面 (GUI) 制作窗口

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=
```

```
0.950 1 0.891 3 0.821 4 0.921 8
0.231 1 0.762 1 0.444 7 0.738 2
0.606 8 0.456 5 0.615 4 0.176 3
0.486 0 0.018 5 0.791 9 0.405 7
```

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

则: B=

```
0.950 1
0.762 1
0.615 4
0.405 7
```

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

则: C=

```
0.950 1 0 0 0
0 0.762 1 0 0
0 0 0.615 4 0
0 0 0 0.405 7
```

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 =`

```
1.100 0 1.200 0 1.300 0 1.400 0 1.500 0 1.600 0 1.700 0
1.800 0 1.900 0
2.100 0 2.200 0 2.300 0 2.400 0 2.500 0 2.600 0 2.700 0
2.800 0 2.900 0
3.100 0 3.200 0 3.300 0 3.400 0 3.500 0 3.600 0 3.700 0
3.800 0 3.900 0
```

```
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 =

$$\begin{matrix} 6 & 8 \\ 10 & 12 \end{matrix}$$

x2 =

$$\begin{matrix} -4 & -4 \\ -4 & -4 \end{matrix}$$

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 =

$$\begin{matrix} 5 & -1 & -3 \\ 3 & 13 & 7 \end{matrix}$$

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
```

则：

$$\begin{matrix} 47 & 68 & 89 \\ 37 & 51 & 65 \\ 32 & 47 & 62 \end{matrix}$$

c2=B*A
则： c2 =

$$\begin{matrix} 20 & 24 & 50 \\ 26 & 34 & 68 \\ 37 & 57 & 106 \end{matrix}$$

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： \backslash 和 $/$ ，分别表示左除和右除。如果 A 矩阵是非奇异方阵，则 $A\backslash B$ 和 B/A 运算可以实现。 $A\backslash B$ 等效于 A 的逆左乘 B 矩阵，也就是 $\text{inv}(A)*B$ ，而 B/A 等效于 A 矩阵的逆右乘 B 矩阵，也就是 $B*\text{inv}(A)$ 。

对于含有标量的运算，两种除法运算的结果相同，如 $1/2$ 和 $2\backslash 1$ 所得的值相等，都等于 2。又设 $a=[5,10]$ ，则 $a/5=5\backslash a=[1,2]$ 。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 $A\backslash B \neq B/A$ 。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 =

$$\begin{matrix} 0.769 & 2 & 1.538 & 5 & 2.307 & 7 \\ 3.692 & 3 & 5.717 & 9 & 7.743 & 6 \\ -2.307 & 7 & -5.170 & 9 & -8.034 & 2 \end{matrix}$$

c2=b/a

则： c2 =

$$\begin{matrix} -9.978 & 6 & 1.222 & 2 & 4.918 & 8 \\ -11.303 & 4 & 1.444 & 4 & 5.953 & 0 \\ -12.628 & 2 & 1.666 & 7 & 6.987 & 2 \end{matrix}$$

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
```