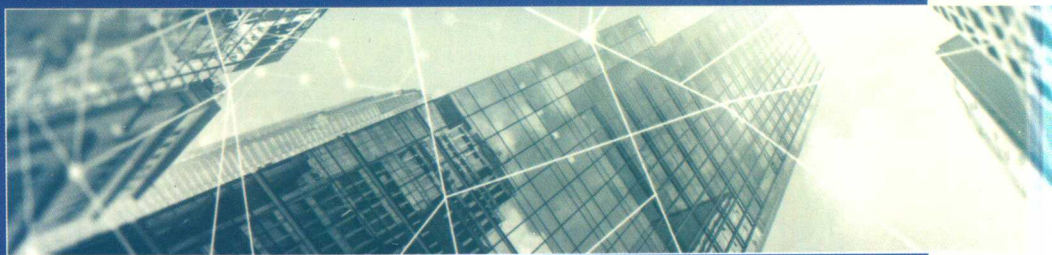


高等学校电子信息类“十三五”规划教材

# 基于MATLAB的 通信系统高级仿真



臧国珍 黄葆华 郭明喜 编著

 西安电子科技大学出版社  
<http://www.xduph.com>

高等学校电子信息类“十三五”规划教材

# 基于 MATLAB 的通信系统高级仿真

臧国珍 黄葆华 郭明喜 编著



---

西安电子科技大学出版社

## 内 容 简 介

本书以现代通信系统组成为主线,对通信系统中的一些基本原理和典型问题进行了重点阐述和 MATLAB 仿真实现,同时兼顾技术原理的实践应用和前沿技术发展,对当前无线通信领域中的一些典型通信系统进行了介绍和综合仿真。

本书共 9 章,内容包括 MATLAB 语言基础、确知信号与随机信号分析、数字信号的基带传输、数字载波调制、模拟信号的数字化、信道编码、同步原理、无线衰落信道的建模与仿真、典型数字通信系统 MATLAB 仿真实例。

本书注重实践和应用,实例丰富,叙述简明,通俗易懂,可作为普通高等学校通信与信息类相关专业本科高年级和研究生教材,也可作为相关工程技术人员的参考用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

基于 MATLAB 的通信系统高级仿真 / 臧国珍, 黄葆华, 郭明喜编著. —西安: 西安电子科技大学出版社, 2019. 11

ISBN 978 - 7 - 5606 - 5436 - 2

I. ①基… II. ①臧… ②黄… ③郭… III. ①Matlab 软件—应用—通信系统—系统仿真 IV. ①TN914

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 192247 号

策划编辑 陈 婷

责任编辑 买永莲

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

网 址 www.xduph.com

电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西天意印务有限责任公司

版 次 2019 年 11 月第 1 版 2019 年 11 月第 1 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 22

字 数 523 千字

印 数 1~3000 册

定 价 49.00 元

ISBN 978 - 7 - 5606 - 5436 - 2/TN

**XDUP 5738001 - 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

随着信息技术的高速发展,为满足社会对信息类人才的大量需求,越来越多的高等院校开展了通信与信息类专业的人才培养工作。本书从通信与信息类专业的课程学习与应用需求出发,对通信系统中的一些基本原理和典型问题进行了重点阐述和 MATLAB 仿真实现,以期帮助读者快速入门并熟练掌握利用 MATLAB 编程解决通信系统中典型问题的基本思想与方法,同时以应用实例的形式增强读者对通信系统中众多基本概念与原理知识的理解与掌握。

本书在编写过程中,力求条理清晰、简洁明了、深入浅出、通俗易懂。与其他同类教材相比,本书具有如下特点:

(1) 在章节内容的选取上,以现代通信系统组成为主线,对通信系统中的一些基本原理和典型问题进行了重点阐述,同时兼顾技术原理的实践应用和前沿发展,对当前无线通信领域中的一些典型通信系统进行了介绍和综合仿真,力求保证通信系统原理知识的完整性和系统性,同时又兼顾技术知识的先进性和实用性,尽力做到主线明确、点面结合、难度适中、实例丰富。

(2) 在具体内容的阐述上,以通信系统的模块框图和信号处理流程为参照,在详细论述其原理的基础上给出其实现方法,同时力求对问题的描述更贴近实际,增强问题解决方法实用性和典范性。如对通信信号的表示主要采用了过抽样形式,充分展示了通信信号在系统传输过程中的真实形态,这不仅使仿真过程能较好地模拟通信系统的实际工作过程,增强了仿真结论的实用性,也有助于增强读者对基本原理的直观理解,便于达到融会贯通。

(3) 在程序结构的设计上,力求与理论框图所描述的信号处理流程一一对应,并对程序模块和程序语句加了大量注释,提高了程序的可读性。

(4) 在程序模块的实现上,力求使用 MATLAB 的基本语句来实现通信系统中涉及的各种信号处理算法,使读者在得到编程方法训练的同时对所学理论知识有更多更深刻的领悟,也提高了程序的可操作性。

全书共 9 章,第 1 章为 MATLAB 语言基础,通过本章的学习可帮助读者(特别是初次接触 MATLAB 语言编程的读者)快速入门并熟练掌握 MATLAB 编程的基本方法和技巧。第 2 章为确知信号与随机信号分析,主要介绍在 MATLAB 环境中如何产生通信系统中的实体对象——确知信号和随机信号,并对它们进行时频域分析,这是对通信系统进行 MATLAB 仿真的基础。第 3 章为数字信号的基带传输,主要介绍数字基带波形信号的产生、基于匹配滤波的最佳接收、无码间串扰传输系统设计等方面的相关内容及其涉及的一些典型

问题的 MATLAB 仿真。第 4 章为数字载波调制，重点介绍 MASK、MPSK、MFSK 等几种数字载波调制原理及其系统仿真。第 5 章为模拟信号的数字化，重点介绍标量量化和矢量量化两大类模拟信号量化方法，以及 PCM 和  $\Delta M$  两种模拟信号数字传输系统的 MATLAB 仿真问题。第 6 章为信道编码，重点介绍线性分组码、卷积码等一些常用信道编码的编译码方法及其 MATLAB 实现，简要给出了 Turbo 码和 LDPC 码这两种逼近 Shannon 极限的典型码字的编译码原理。第 7 章为同步原理，重点讨论载波同步、位同步和群同步的典型实现方法。第 8 章为无线衰落信道的建模与仿真，介绍一些无线信道的衰落特性及典型衰落信道的 MATLAB 仿真实现，为无线衰落信道中的通信系统仿真提供参考。第 9 章对扩频通信(直扩和跳频)、MIMO 通信、协同通信及 OFDM 系统等几种典型的现代通信系统进行介绍，对系统中的主要模块或传输性能进行综合仿真。此外，需特别说明的一点是，本书仿真结果中的字母、符号的标注因修改的不便，以及为了不影响原图的质量，因此未采用标准的标注形式，但这并不影响读者的理解。

本书由臧国珍、黄葆华和郭明喜共同编写，其中第 1~2 章、第 4 章的 4.1~4.4 节由黄葆华编写，第 6 章的 6.1~6.3 节由郭明喜编写，其余部分的编写及全书的统编工作由臧国珍完成。

本书计划授课课时为 40 学时，也可根据需要对内容进行适当删减，用于较少学时的教学。本书适合通信与信息类相关专业本科、研究生及相关工程技术人员等多层次读者学习参考。

在本书的编写过程中，解放军陆军工程大学通信工程学院通信战术教研室的领导和同事给予了很大的支持和帮助，在此深表感谢。

由于作者水平有限，书中不足之处在所难免，敬请读者不吝赐教。

编者

2019 年 2 月于南京

# 目 录

<b>第 1 章 MATLAB 语言基础</b> .....	1
1.1 MATLAB 语言概述 .....	1
1.1.1 MATLAB 的特点 .....	1
1.1.2 MATLAB 工具箱 .....	1
1.2 MATLAB 编程基础 .....	2
1.2.1 MATLAB 运行方式 .....	2
1.2.2 MATLAB 中的运算和常用函数 .....	6
1.2.3 MATLAB 中的变量 .....	9
1.2.4 数组、向量和矩阵的创建 .....	9
1.3 MATLAB 绘图功能 .....	12
1.3.1 二维数据曲线图的绘制 .....	12
1.3.2 二维图形的修饰 .....	13
1.3.3 在图形上添加曲线 .....	14
1.3.4 图形窗口的分割 .....	15
1.3.5 其他常用二维图形的绘制 .....	16
1.4 MATLAB 程序结构 .....	17
1.4.1 顺序结构 .....	17
1.4.2 循环结构 .....	17
1.4.3 分支结构(选择结构) .....	19
<b>第 2 章 确知信号与随机信号分析</b> .....	21
2.1 概述 .....	21
2.2 确知信号分析 .....	21
2.2.1 确知信号在 MATLAB 中的抽样表示 .....	21
2.2.2 周期信号的频谱分析 .....	23
2.2.3 周期信号通过线性系统 .....	27
2.2.4 傅里叶变换 .....	30
2.2.5 功率和能量 .....	35
2.2.6 带通信号的低通等效 .....	39
2.3 随机信号的产生与处理 .....	41
2.3.1 MATLAB 中随机数的产生 .....	41
2.3.2 白噪声通过滤波器 .....	44
2.3.3 窄带高斯过程 .....	51
习题 .....	53
<b>第 3 章 数字信号的基带传输</b> .....	54
3.1 概述 .....	54
3.2 数字基带信号及其频谱分析 .....	55

3.2.1	数字基带信号的码型 .....	55
3.2.2	数字基带信号的频谱分析 .....	66
3.3	数字基带信号的最佳接收 .....	77
3.3.1	AWGN 信道中的最佳接收机 .....	77
3.3.2	二进制数字基带传输系统的性能仿真 .....	85
3.4	码间串扰 .....	96
3.4.1	码间串扰的基本概念 .....	96
3.4.2	无码间串扰的传输特性 .....	97
3.4.3	无码间串扰传输系统设计 .....	100
3.5	部分响应技术 .....	103
3.5.1	第 I 类部分响应波形 .....	104
3.5.2	第 IV 类部分响应波形 .....	109
3.6	均衡技术 .....	112
3.6.1	线性均衡器 .....	113
3.6.2	非线性均衡器 .....	123
	习题 .....	124
<b>第 4 章</b>	<b>数字载波调制</b> .....	<b>125</b>
4.1	概述 .....	125
4.2	载波振幅调制(MASK) .....	125
4.2.1	MASK 调制原理 .....	125
4.2.2	MASK 信号解调原理 .....	126
4.3	载波相位调制(MPSK、MDPSK) .....	130
4.3.1	MPSK 调制与解调 .....	130
4.3.2	差分相位调制与解调 .....	137
4.4	载波频率调制(MFSK) .....	142
4.4.1	MFSK 表达式 .....	142
4.4.2	MFSK 信号带宽及频带利用率 .....	142
4.4.3	MFSK 信号的解调 .....	143
4.5	最小频移键控调制(MSK) .....	147
4.5.1	MSK 调制与解调原理 .....	147
4.5.2	MSK 调制系统的 MATLAB 仿真 .....	151
4.6	正交振幅调制(QAM) .....	158
4.6.1	MQAM 调制与解调原理 .....	158
4.6.2	MQAM 调制系统的 MATLAB 仿真 .....	159
	习题 .....	168
<b>第 5 章</b>	<b>模拟信号的数字化</b> .....	<b>169</b>
5.1	概述 .....	169
5.2	量化 .....	169
5.2.1	标量量化 .....	169
5.2.2	矢量量化 .....	181
5.3	脉冲编码调制(PCM) .....	183
5.3.1	均匀 PCM .....	183
5.3.2	非均匀 PCM .....	188

5.4	增量调制( $\Delta M$ )	198
5.4.1	$\Delta M$ 编译码的基本思想	199
5.4.2	简单 $\Delta M$ 系统模型	200
	习题	204
<b>第6章</b>	<b>信道编码</b>	<b>205</b>
6.1	概述	205
6.1.1	差错控制方式	205
6.1.2	信道编码的基本原理及相关概念	206
6.2	线性分组码	209
6.2.1	线性分组码的编译码原理	209
6.2.2	线性分组码的 MATLAB 仿真	212
6.3	卷积码	220
6.3.1	卷积码的编译码原理	220
6.3.2	卷积码的 MATLAB 仿真	223
6.4	Turbo 码	234
6.4.1	Turbo 码的编码原理	235
6.4.2	Turbo 码的译码原理	240
6.5	LDPC 码	242
6.5.1	LDPC 码的编码原理	243
6.5.2	LDPC 码的译码原理	245
	习题	246
<b>第7章</b>	<b>同步原理</b>	<b>247</b>
7.1	概述	247
7.2	载波同步	247
7.2.1	平方变换法	248
7.2.2	科斯塔斯环法	249
7.3	位同步	253
7.3.1	迟一早门闭环法	253
7.3.2	数字锁相环法	256
7.4	群同步	258
7.4.1	巴克码及其识别器	258
7.4.2	群同步的保护	261
	习题	265
<b>第8章</b>	<b>无线衰落信道的建模与仿真</b>	<b>266</b>
8.1	概述	266
8.2	无线信道的衰落特性	267
8.2.1	Rayleigh 衰落	267
8.2.2	Rician 衰落	269
8.2.3	受遮蔽的 Rician 衰落	270
8.2.4	Nakagami 衰落	273
8.3	平坦 Rayleigh 衰落信道的建模与仿真	274
8.3.1	Clarke 参考模型	274
8.3.2	经典的 Jakes 仿真模型	275

8.3.3 改进的 Jakes 仿真模型 .....	280
8.4 频率选择性衰落信道的建模与仿真 .....	294
8.5 平坦瑞利衰落信道中 BPSK 调制系统的 MATLAB 仿真 .....	296
8.6 信道估计 .....	299
习题 .....	300
<b>第 9 章 典型数字通信系统 MATLAB 仿真实例</b> .....	<b>301</b>
9.1 扩频通信系统 .....	301
9.1.1 概述 .....	301
9.1.2 直接序列扩频通信 .....	302
9.1.3 跳频通信 .....	316
9.2 MIMO 通信系统 .....	323
9.2.1 MIMO 系统模型 .....	323
9.2.2 MIMO 系统的信道容量 .....	324
9.2.3 空间分集与 MIMO 系统的性能仿真 .....	327
9.3 协同通信系统 .....	331
9.3.1 协同策略简介 .....	332
9.3.2 典型协同通信系统仿真 .....	334
9.4 OFDM 通信系统 .....	336
9.4.1 OFDM 系统模型 .....	337
9.4.2 OFDM 调制解调的 DFT 算法实现 .....	338
9.4.3 保护间隔和循环前缀 .....	341
<b>参考文献</b> .....	<b>344</b>

# 第1章 MATLAB语言基础

## 1.1 MATLAB语言概述

MATLAB语言被认为是一种解释性语言,用户可以在MATLAB的工作空间中键入一个命令,也可以应用MATLAB语言编写应用程序;MATLAB软件对该命令或程序中的各条语句进行翻译,然后在MATLAB环境中对它进行处理,最后返回运算结果。

MATLAB语言由早期专门用于矩阵运算的计算机语言发展而来,正如其名称“矩阵实验室”(Matrix Laboratory)的含义一样,它最基本也是最重要的功能就是“进行实数矩阵或复数矩阵的计算”。因向量可作为矩阵的一列或一行,标量(一个数)有时则作为只含一个元素的矩阵,故向量和标量都可以作为特殊矩阵来处理。MATLAB的操作和命令对于矩阵来说,并不完全等同于我们平时使用的形式,而是有它自己的规定。

### 1.1.1 MATLAB的特点

与C、C++、FORTRAN、PASCAL和BASIC这些高级程序设计语言相比,MATLAB不但在数学语言的表达与解释方面表现出人机交互的高度一致,而且具有作为优秀高级计算环境所不可缺少的如下特征:

- (1) 高质量、高可靠的数值计算能力;
- (2) 基于向量、数组和矩阵的高级程序设计语言;
- (3) 高级图形和可视化数据处理能力;
- (4) 广泛解决各学科专业领域内复杂问题的能力;
- (5) 拥有一个强大的非线性系统仿真工具箱——SIMULINK;
- (6) 支持科学和工程计算标准的开放式、可扩充结构;
- (7) 跨平台兼容。

### 1.1.2 MATLAB工具箱

目前MATLAB已经成为国际上最为流行的软件之一,它除了传统的交互式编程之外,还提供了丰富可靠的矩阵运算、图形绘制、数据处理、图像处理及方便的Windows编程等便利工具,出现了各种以MATLAB为基础的实用工具箱,广泛应用于自动控制、图像信号处理、生物医学工程、语音处理、雷达工程、信号分析、振动理论分析、时序分析与建模、化学统计学、优化设计等领域,并表现出一般高级语言难以比拟的优势。较为常见的MATLAB工具箱主要包括:

- (1) 控制系统工具箱(Control System Toolbox);
- (2) 系统识别工具箱(System Identification Toolbox);

- (3) 信号处理工具箱(Signal Processing Toolbox);
- (4) 小波分析工具箱(Wavelet Toolbox);
- (5) 通信工具箱(Communications Toolbox);
- (6) 多变量频率设计工具箱(Multivariable Frequency Design Toolbox);
- (7) 分析与综合工具箱(Analysis And Synthesis Toolbox);
- (8) 神经网络工具箱(Neural Network Toolbox);
- (9) 最优化工具箱(Optimization Toolbox);
- (10) 模糊推理系统工具箱(Fuzzy Inference System Toolbox)。

## 1.2 MATLAB 编程基础

### 1.2.1 MATLAB 运行方式

MATLAB 的工作方式有两种：命令方式和 m 文件方式。命令方式即用户在命令窗口中输入命令并按下回车键后，系统执行该命令并立即给出运算结果。m 文件是由 MATLAB 语句构成的文件，且文件名必须以 .m 为扩展名，如 example.m。用户可以用任何文件编辑器来对 m 文件进行编辑。

#### 1. 命令运行方式

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。其具体方法是：单击 MATLAB 图标，打开 MATLAB 命令窗口，如图 1-2-1 所示。

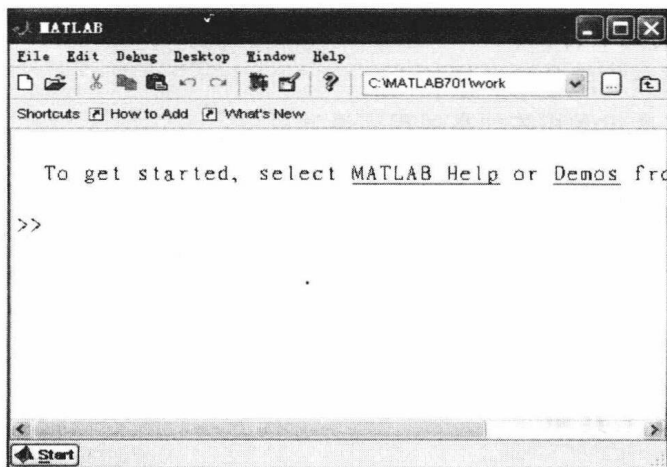


图 1-2-1 MATLAB 命令窗口

在命令窗口中的提示符后面输入下面的命令行：

```
>> (5 * 2 + 1.3 - 0.8) * 10 / 25
```

按回车键，MATLAB 会将运算结果直接存入变量 ans，代表 MATLAB 运算后的答案，并将其数值显示在屏幕上：

```
ans = 4.2000
```

也可将上述表达式的结果设定给另一个变量 x，此时 MATLAB 会在屏幕上直接显示

x 的值。例如，在提示符下输入：

```
>>x = (5 * 2 + 1.3 - 0.8) * 10^-2/25
```

按回车键后，屏幕显示：

```
x = 42
```

## 2. m 文件运行方式

若要一次执行一系列的 MATLAB 命令，则将这些命令存放于一个扩展名为 .m 的文件中，并在 MATLAB 提示符下键入此文件名即可。与命令行方式相比，m 文件方式的优点是可调试、可重复运行。

### 1) m 文件的建立

m 文件是一个文本文件，可以用任何编辑程序建立和编辑，而一般常用且最为方便的是使用 MATLAB 提供的文本编辑器。启动 MATLAB 文本编辑器有以下三种方法：

(1) 菜单操作。从 MATLAB 主窗口的 File 菜单中选择 New 菜单项，再选择 M-File 命令，屏幕上将出现 MATLAB 文本编辑器窗口，如图 1-2-2 所示。MATLAB 文本编辑器是一个集编辑与调试功能于一体的工具环境，利用它不仅可以完成基本的文本编辑操作，还可以对 m 文件进行调试。启动文本编辑器后，在文档窗口中输入 m 文件的内容。输入完毕后，选择文本编辑器窗口中的 File 菜单的 Save 或 Save As 命令存盘。需要注意的是，m 文件存放的位置一般是 MATLAB 默认的用户工作目录 C:\MATLAB\work，当然也可以是别的目录；如果是别的目录，则应该将该目录设定为当前目录或将其加到搜索路径中。



图 1-2-2 MATLAB 文本编辑器窗口

(2) 命令操作。在 MATLAB 命令窗口中输入命令 edit，启动 MATLAB 文本编辑器，输入 m 文本的内容并存盘。

(3) 命令按钮操作。单击 MATLAB 主窗口工具栏上的 New M-File 命令按钮，启动 MATLAB 文件编辑器后，输入 m 文件内容并存盘。

### 2) 打开已有的 m 文件

打开已有的 m 文件也有以下三种方法：

(1) 菜单操作。从 MATLAB 主窗口的 File 菜单中选择 Open 命令，则屏幕上将出现 Open 对话框，在 Open 对话框中选中所需打开的 m 文件。在文档窗口中可以对打开的 m 文件进行编辑修改，完成后将 m 文件存盘。

(2) 命令操作。在 MATLAB 命令窗口中输入 edit 文件名, 则可以打开指定的 m 文件。

(3) 命令按钮操作。单击 MATLAB 主窗口工具栏上的 Open File 命令按钮, 再从弹出的对话框中选择要打开的 m 文件。

### 3) 函数文件

函数文件是 m 文件的一种形式, 每个函数文件都定义一个函数, 事实上 MATLAB 提供的标准函数大部分都是由函数文件定义的。

函数文件由 function 语句引导, 基本结构为

```
function 输出形参 = 函数名(输入形参)
    函数的注释说明
    函数语句
```

其中, 以 function 开头的一行为引导行, 表示该 m 文件是一个函数文件。函数名的命名规则与变量名命名规则相同(见后)。输入形参为函数的输入参数, 输出形参为函数的输出参数。当输出形参多于一个时, 应该用方括号括起来。

**例 1-2-1** 编写函数文件, 求长为 a、宽为 b 的矩形的面积和对角线长度。

**解** 本例 MATLAB 源参考程序如下:

```
function [s, d] = rectangle(a, b)
% RECTANGLE 函数: 计算矩形的面积和对角线长度
% a 为矩形长度
% b 为矩形宽度
% s 为矩形面积
% d 为矩形对角线长度
s=a * b;
d=sqrt(a^2+b^2)
```

以默认文件名 rectangle.m 存入, 然后在命令窗口的提示符下输入:

```
>> [s, d] = rectangle(3, 4)
```

按回车键, 屏幕显示:

```
s =
    12
d =
     5
```

说明:

(1) 函数文件名。函数文件名 MATLAB 默认由函数名再加上扩展名 .m 组成, 保存时也可以将其改为其他文件名, 最好是采用系统默认文件名, 以免带来不必要的差错。

(2) 注释部分。注释说明包括三个部分: 第一部分包括大写的函数文件名和函数功能的简要描述, 供 lookfor 关键词查询和 help 在线帮助用; 第二部分包括输入/输出参数说明及调用格式说明等信息, 构成全部在线帮助文本; 第三部分需与前面隔一行, 包括函数文件编写和修改信息, 如作者、日期和版本等信息, 用于软件档案管理。

采用 help 和 lookfor 可以显示注释说明部分的内容, 其功能和一般 MATLAB 函数的帮助信息是一致的。例如, 在命令窗口提示符下输入:

```
>> help rectangle
```

按回车键，屏幕显示：

RECTANGLE 函数：计算矩形的面积和对角线长度

a 为矩形长度

b 为矩形高度

s 为矩形面积

d 为矩形对角线长度

#### 4) 函数调用

函数文件编写完后，就可以调用函数进行计算了。函数调用的一般格式为

[输出实参列表] = 函数名(输入实参列表)

要注意的是，函数调用时各实参出现的顺序、个数应与函数定义时的形参顺序、个数一致，否则会出错。函数调用时，先将实参传递给相应的形参，实现参数传递，再执行函数功能。

**例 1-2-2** 编写程序调用例 1-2-1 函数。

**解** 本例 MATLAB 源参考程序如下：

```
e=3;
```

```
f=4;
```

```
[area, dia] = rectangle(e, f);
```

```
area
```

```
diameter
```

保存此程序为 diaorectangle.m，然后在命令窗口提示符下输入：

```
diaorectangle
```

按回车键，屏幕显示：

```
area =
```

```
12
```

```
dia =
```

```
5
```

### 3. MATLAB 中的窗口

MATLAB 中常见的窗口有命令窗口、m 文件编辑窗口、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) 在命令窗口中可以输入命令，实现计算或绘图功能。

(2) 在 m 文件编辑窗口中，利用 Edit 菜单中的选项可对 m 文件进行编辑；利用 Debug 菜单中的选项可以进行调试，如设置断点和取消断点，可以选定运行方式如逐行运行、运行到光标处等，单击选定选项，进行运行调试。

(3) 当前目录窗口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) 工作空间窗口中列出了数据的变量信息，包括变量名、变量数组大小、变量字节大小和变量类型。

(5) 命令历史窗口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。在命令历史窗口中，可双击某个命令来执行该命令；也可以通过拖拉或复制操作，将命令复制到命令窗口后再执行。

### 4. MATLAB 使用中的若干技巧

(1) 数条语句出现在同一行中，只要用分号或逗号将它们分割开来即可。如果在语句

尾端是分号“;”，则 MATLAB 不会将其运行结果直接显示在屏幕上。例如：

```
apples=4, bananas=6; cantaloupes=2
```

(2) 如果某条语句很长，一行放不下，则键入“...”后回车，即可在下一行继续输入。注意在“...”前要留有空格。例如：

```
S=1-1/2+1/3-1/4+1/5-1/6 ...
    -1/8+1/9-1/10
```

(3) 在任意状态只要键入 Ctrl+C，即可终止 MATLAB 程序。

(4) 在 MATLAB 的命令窗口中键入 quit 或 exit，即可退出 MATLAB。

## 1.2.2 MATLAB 中的运算和常用函数

### 1. 算术运算

用 MATLAB 进行数学运算，就像在计算器上做算术一样简单方便。因此，MATLAB 被誉为“演算纸式的科学计算语言”。在 MATLAB 的工作界面中可以极为方便地进行如表 1-2-1 所示的算术运算。

表 1-2-1 MATLAB 中的算术运算

算术运算	MATLAB 中的符号表示	示例
加法	+	5+3
减法	-	45-23
乘法(包括标量乘、矩阵乘、标量与矩阵乘)	*	12.6 * 4.5
除法(包括标量除、矩阵除、数组与矩阵除标量)	/ 或 \	57/9
幂次方(包括标量求幂、矩阵求幂，注意矩阵须为方阵)	^	a ^ 2
两个同维数组中的元素相乘	.*	a=[1 2 3 4] b=[5 6 7 8] a.*b=[5 12 21 32]
两个同维数组中的元素相除	./或.\	a=[2 4 6 8] b=[2 4 6 8] a.\b=[1 1 1 1]
对数组中的每个元素求幂	.^	a=[1 2 3 4] a.^2=[1 4 9 16]

表 1-2-1 中的后三种运算是 MATLAB 的特殊运算，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。若是两矩阵进行点运算，则是指它们的对应元素进行相关运算，故要求参与运算的矩阵必须具有相同的维数。

若不想让 MATLAB 每次都显示运算结果，只需在运算式最后加上分号(;)即可，如下例：

```
>> y = sin(10) * exp(-0.3 * 4^2);
```

若要显示变数  $y$  的值，直接输入  $y$  即可：

```
>> y
```

按回车键，屏幕显示：

```
y = -0.0045
```

## 2. 常用的基本数学函数和三角函数

在上例中， $\sin$  是正弦函数， $\exp$  是指数函数。MATLAB 为用户提供了丰富的数学函数和三角函数，用户根据自己的不同要求，可以方便地调用函数。表 1-2-2 归纳了 MATLAB 常用的基本数学函数和三角函数。

表 1-2-2 MATLAB 常用数学函数和三角函数

MATLAB 中的数学函数和三角函数	说明	示例
$\text{abs}(x)$	求绝对值或复数的模	$\text{abs}(-4)=4$
$\text{angle}(z)$	求复数的角度	$\text{angle}(1+i)=0.7854$
$\text{sqrt}(x)$	开平方	$\text{sqrt}(4)=2$
$\text{real}(z)$	求复数的实部	$\text{real}(1+2i)=1$
$\text{imag}(z)$	求复数的虚部	$\text{imag}(1+2i)=2$
$\text{conj}(z)$	求复数的共轭	$\text{conj}(1+2i)=1-2i$
$\text{round}(x)$	四舍五入到最接近的整数	$\text{round}(3.4)=3$
$\text{fix}(x)$	向零方向取整	$\text{fix}(3.6)=3$
$\text{floor}(x)$	向负无穷方向取整	$\text{floor}(-2.6)=-3$
$\text{ceil}(x)$	向正无穷方向取整	$\text{ceil}(-2.6)=-2$
$\text{rat}(x)$	将实数化为分数	$\text{rat}(2.5)=3+(-1/2)$
$\text{rats}(x)$	将实数化为多项分数展开	$\text{rats}(2.5)=5/2$
$\text{sign}(x)$	符号函数	$\text{sign}(-2.6)=-1$ $\text{sign}(0)=0$ $\text{sign}(-2.6)=1$
$\text{exp}(x)$	指数函数	$\text{exp}(2)=7.3891$
$\text{log}(x)$	自然对数	$\text{log}(3)=1.0986$
$\text{log10}(x)$	常用对数	$\text{log10}(10)=1$
$\text{rem}(x, y)$	除后取余数	$\text{rem}(4, 2)=0$
$\text{sin}(x)$	正弦函数	$\text{sin}(\text{pi}/4)=0.7071$
$\text{cos}(x)$	余弦函数	$\text{cos}(\text{pi}/4)=0.7071$
$\text{tan}(x)$	正切函数	$\text{tan}(\text{pi}/4)=1.000$
$\text{asin}(x)$	反正弦函数	$\text{asin}(0.7071)=0.7854$
$\text{acos}(x)$	反余弦函数	$\text{acos}(0.7071)=0.7854$
$\text{atan}(x)$	反正切函数	$\text{atan}(\text{sqrt}(3))=1.0472$

### 3. 关系和逻辑运算

MATLAB 提供了 6 种关系运算和 3 种逻辑运算，如表 1-2-3 所示。

表 1-2-3 MATLAB 中的关系运算和逻辑运算符

关系运算和逻辑运算符	说 明	在提示符下输入下列式子，按回车键，并记下结果
=	等于	(2==3)
~=	不等于	(2~=3)
<	小于	(2<3)
>	大于	(2>3)
<=	小于等于	(2<=3)
>=	大于等于	(2>=3)
& 或者 and	与运算	0&1, and(0, 1)
或者 or	或运算	0 1, or(0, 1)
~ 或者 not	非运算	~1, not(1)

6 种关系运算的运算规则是：若关系式成立，则结果为 1；若关系式不成立，则结果为 0。除此之外，MATLAB 还提供了一些关系与逻辑运算函数，如表 1-2-4 所示。

表 1-2-4 MATLAB 中关系和逻辑运算函数

函数名	含 义	在提示符下输入下列式子，按回车键，并记下结果
all	若向量的所有元素为零，则结果为 1	A=[0 0 0 1]; all(A)
any	向量中任何一个元素为非零，结果为 1	any(A)
exist	检查变量在工作空间是否存在，若存在，则结果为 1，否则为 0	exist('A')
find	找出向量或矩阵非零元素的位置	find(A)
isempty	若被检查变量是空矩阵，则结果为 1	isempty(A)
isglobal	若被检查变量为全局变量，则结果为 1	isglobal(A)
isinf	若元素为 +inf 或 -inf，则结果矩阵相应位置元素取 1，否则取 0	isinf(A)
isnan	若元素是 nan，则结果矩阵相应位置元素取 1，否则取 0	isnan(A)
isfinite	若元素值大小有限，则结果矩阵相应位置元素取 1，否则取 0	isfinite(A)
isstr	若变量是字符串，则结果为 1，否则为 0	isstr(A)