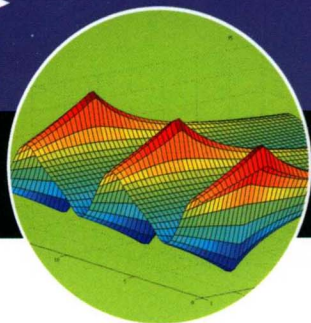




普通高等教育“十三五”规划教材
空天电子信息国家级实验教学示范中心系列教材

Electronic Information
Innovation

■ 电子信息类综合创新实践系列教材



信号处理与系统分析的 MATLAB 实现

◎ 王文光 魏少明 任 欣 编著



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

电子信息类综合创新实践系列教材

信号处理与系统分析的 MATLAB 实现

王文光 魏少明 任欣 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书结合大学信号与系统课程,介绍了信号处理与系统分析的基础理论和基于 MATLAB 的实现方法。全书共 7 章,内容包括:MATLAB 基础、信号的图形表示、信号变换、线性时不变系统、信号采样与重构、基于罗兰 C 信号的综合仿真和信号与系统 MATLAB 演示软件。前 5 章主要针对课程教学的具体内容,后两章则是属于综合提高。本书各章节在内容安排上,首先进行原理和方法说明,然后对学习中需要深刻理解的一些知识点有针对性地设计了 MATLAB 仿真和验证案例。读者通过编程实现和观察仿真结果可以加深对所学知识的掌握和理解,也为更深入地思考信号与系统的相关问题奠定基础。本书在仿真验证基本理论的同时,也为学生学习和利用软件仿真,提高编程验证能力提供了参考例程。

本书可作为电子信息工程及相关专业本科学生学习信号与系统课程的参考书,供学生课后复习和深入理解所学基础理论使用,也可作为信号与系统课程的实验指导书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

信号处理与系统分析的 MATLAB 实现 / 王文光, 魏少明, 任欣编著. —北京: 电子工业出版社, 2018.5
ISBN 978-7-121-34009-3

I. ①信… II. ①王… ②魏… ③任… III. ①数字信号处理—Matlab 软件—高等学校—教材②信号系统—系统分析—Matlab 软件—高等学校—教材 IV. ①TN911.72②TN911.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 070378 号

策划编辑: 竺南直

责任编辑: 底 波

印 刷: 三河市良远印务有限公司

装 订: 三河市良远印务有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1 092 1/16 印张: 12.75 字数: 326 千字

版 次: 2018 年 5 月第 1 版

印 次: 2018 年 5 月第 1 次印刷

定 价: 38.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式: davidzhu@phei.com.cn。

前 言

信号与系统是高等院校通信和电子类专业的一门重要专业基础课，该课程主要研究确定信号与线性时不变系统的基本概念和分析方法。信号与系统课程是学习通信原理、自动控制、数字信号处理等专业课程的基础，在课程体系中处于连接基础课与专业课的桥梁位置。正因如此，信号与系统课程是很多高校硕士研究生入学考试的科目之一。

信号与系统在内容上具有较强的系统性和抽象性，对问题分析的角度也跨越了时域、频域、复频域等多个域，具有多样性。另外，信号与系统模型的建立又包含了很多数学及物理问题，涉及的知识面很宽。在具体问题的解决过程中，很多时候并不采用直接性的方法，通常是通过与基本信号的关系来求解，这就存在处理方法和基本信号的选择问题。结合信号与系统课程的学习，对所涉及的信号问题和系统问题的理解和分析都需要不断拓宽思路，灵活采用多种方式来展现信号与系统的特点。作者近年来一直从事信号与系统课程的教学工作，在教学过程中，深感基础理论和基本方法对于掌握本课程的知识以及后续其他课程的学习，甚至对于以后参与科研和生产都有重要的影响。

MATLAB 是一种可用于算法开发、数据可视化、数据分析以及数值计算的高级计算语言。为科学研究、工程设计以及必须进行数值计算的众多科学领域提供了一种全面的解决方案，并在很大程度上摆脱了传统非交互式程序设计语言（如 C、Fortran）的编辑模式，代表了当今国际科学计算软件的先进水平，并在诸多领域的科学研究和仿真验证中得到了广泛的应用。利用 MATLAB 对信号与系统所涉及的关键知识点进行仿真和验证，一方面通过观察仿真结果可以加深对所学知识的掌握和理解，另一方面也为更深入地思考信号与系统的相关问题奠定基础。作者在教学中会利用 MATLAB 对课程中信号处理和系统分析的重要知识点进行演示，并通过仿真结果的对比和分析引导学生更深入地思考相关的问题，这种做法得到了学生的认可，结合多年来积累的课堂演示例程，并经过系统整理编写了本书。

目前信号与系统课程的教材有很多，部分术语的用法也不完全一致，在本书编写过程中，主要参考了由 Alan V. Oppenheim 和 Alan S. Willsky 编著，并由西安交通大学刘树棠教授翻译的《信号与系统》（西安交通大学出版社），以及北京航空航天大学熊庆旭教授等编著的《信号与系统》（高等教育出版社）的内容。本书的组织架构没有完全按照信号与系统教材的内容和讲授顺序来组织，而是从信号处理、线性时不变系统分析、综合应用几个方面来组织的。这主要是考虑到本书不是课堂教学的同步辅导，只是结合作者课堂教学的经验，抽取了部分知识点进行说明和仿真分析，本书中不同章节的知识点会存在一定的相关性，对于相关性较强的部分就在本书中组织到了一起，并进行了适当的延伸，以便于读者对比分析。

本书的第 1 章是 MATLAB 基础，已经具备该基础的读者可以略过该内容。第 2 章是信号的图形表示，是开展信号处理和系统分析的基础。第 3 章是信号变换，具体包括了傅里叶级数表示、连续信号的傅里叶变换、连续信号的拉普拉斯变换，这三部分都属于信号处理的范畴，尽管安排在同一章中，但它们位于不同的节中，内容相对独立；第 3 章还包括了离散时间信号的 Z 变换。第 4 章是线性时不变系统，具体包括离散系统的卷积、连续系统的卷积和

线性时不变系统的频率响应，主要体现了系统分析的思路和方法。第 5 章是信号采样与重构，主要对采样定理进行分析和说明。第 6 章是基于罗兰 C 信号的综合仿真，结合罗兰 C 的特点，综合利用所学的信号处理与系统分析的知识开展仿真，增强解决实际问题的能力。第 7 章是 MATLAB 演示软件，供读者在学习过程中加强对所学知识的感性认识。

本书在利用 MATLAB 进行仿真时，对于类似的问题，尽可能采用多种不同的实现方法，使读者通过对不同方法的对比更深入地理解基础理论，同时也为以后开展科学仿真提供借鉴和参考。

本书从准备到完稿，经过多次修改和完善，在编写过程中，一些硕士研究生和本科生也参与了部分工作，这些同学包括季彧、石家宁、刘凯琪、赵新芳、林晓霞、贺聪聪、杨吉煌等，部分同学目前已经毕业，作者在此对参与本书编写和校对工作的同学表示感谢。北京航空航天大学电子信息工程学院王俊老师、电子工业出版社的竺南直老师和底波老师都对本书提出了很多很好的建议，在此一并致谢。

由于作者水平有限，书中难免存在表达不严谨、不恰当，甚至错误的地方，恳请读者批评指正。

编著者

目 录

第 1 章 MATLAB 基础	(1)
1.1 MATLAB 简介	(1)
1.2 MATLAB 基本操作	(2)
1.2.1 MATLAB 运算模式	(2)
1.2.2 数据类型和算术运算	(4)
1.2.3 关系和逻辑运算符	(6)
1.2.4 数组及其操作	(10)
1.2.5 保存结果	(11)
1.2.6 使用“Help”选项	(12)
1.3 MATLAB 常用函数	(14)
1.3.1 矩阵计算	(14)
1.3.2 矩阵分解	(15)
1.3.3 数学计算函数	(19)
1.3.4 复数与复矩阵	(19)
1.3.5 数组及其操作	(21)
1.4 MATLAB 绘图	(22)
1.4.1 plot()绘制二维图形	(22)
1.4.2 stem()绘制离散数据	(24)
1.4.3 polar()极坐标图	(25)
1.4.4 图形标记和控制指令	(26)
1.4.5 图形生成与控制	(27)
1.4.6 坐标轴生成和控制	(27)
1.4.7 网格、边框、保持	(28)
1.4.8 图形注释	(29)
1.4.9 绘制嵌入窗口	(29)
1.4.10 三维图形绘制	(30)
1.5 M 程序设计	(33)
1.5.1 M 文件的启动	(34)
1.5.2 M 文件形式	(35)
1.5.3 控制结构	(38)
第 2 章 信号的图形表示	(41)
2.1 常见信号的图形表示	(41)
2.1.1 常见连续信号	(41)
2.1.2 常见离散信号	(43)

2.1.3	仿真案例	(45)
2.1.4	仿真练习	(51)
2.2	信号的运算	(51)
2.2.1	原理和方法	(51)
2.2.2	仿真案例	(52)
2.2.3	仿真练习	(58)
第3章	信号变换	(59)
3.1	傅里叶级数	(59)
3.1.1	原理和方法	(59)
3.1.2	仿真案例	(63)
3.1.3	仿真练习	(71)
3.2	连续时间信号的傅里叶变换	(71)
3.2.1	原理和方法	(71)
3.2.2	仿真案例	(76)
3.2.3	仿真练习	(83)
3.3	连续时间信号的拉普拉斯变换	(83)
3.3.1	原理和方法	(83)
3.3.2	仿真案例	(85)
3.3.3	仿真练习	(92)
3.4	离散时间信号的Z变换	(93)
3.4.1	原理和方法	(93)
3.4.2	仿真案例	(94)
3.4.3	仿真练习	(98)
第4章	线性时不变系统	(99)
4.1	离散时间卷积	(101)
4.1.1	原理和方法	(101)
4.1.2	仿真案例	(103)
4.1.3	仿真练习	(112)
4.2	连续时间卷积	(112)
4.2.1	原理和方法	(112)
4.2.2	仿真案例	(114)
4.2.3	仿真练习	(122)
4.3	LTI系统频率响应	(122)
4.3.1	原理和方法	(122)
4.3.2	仿真案例	(123)
4.3.3	仿真练习	(133)
第5章	信号采样与重构	(135)
5.1	采样定理	(135)
5.1.1	原理和方法	(135)

5.1.2	仿真案例	(135)
5.1.3	仿真练习	(140)
5.2	信号重构	(140)
5.2.1	原理和方法	(140)
5.2.2	仿真案例	(141)
5.2.3	仿真练习	(149)
第6章	基于罗兰C信号的综合仿真	(150)
6.1	背景知识	(150)
6.1.1	罗兰C的背景知识	(150)
6.1.2	罗兰C导航系统	(152)
6.1.3	罗兰C系统接收信号分析	(154)
6.2	仿真设计与实现	(158)
6.2.1	仿真分析	(158)
6.2.2	罗兰C信号仿真参考程序	(163)
第7章	信号与系统MATLAB演示软件	(169)
7.1	演示软件简介	(169)
7.1.1	演示软件的使用说明	(169)
7.1.2	信号演示	(170)
7.1.3	奇异信号	(173)
7.1.4	信号变换	(175)
7.2	连续系统	(177)
7.2.1	连续时间信号卷积	(177)
7.2.2	傅里叶变换	(178)
7.2.3	冲激响应和阶跃响应	(182)
7.2.4	信号采样与恢复	(184)
7.2.5	S平面上的零极点图	(186)
7.3	离散系统	(188)
7.3.1	单位样值响应	(188)
7.3.2	离散卷积	(189)
7.3.3	Z平面上的零极点图	(190)
附录A		(192)

第 1 章 MATLAB 基础

1.1 MATLAB 简介

MATLAB 是一种高精度的科学计算语言。它将计算和可视化编程结合起来，给用户提供一个易于使用的环境。在这个环境里，用户可以用熟悉的数学符号来表示问题及其解决方法。它的典型运用包括数学与运算、算法开发、建模与仿真、数值分析、工程图形科学等。作为一个交互式系统，它的基本数据单元为数组，数组不需要固定的大小，因此用户可以灵活解决许多数学问题，特别是涉及矩阵和向量运算的问题。MATLAB 指令表达式类似于数学运算、工程应用中常用的格式。相对于 C 和 Fortran 这些高级语言，MATLAB 的语法规则更为简单。

MATLAB 最重要的特性是它提供了很多已有程序组以解决特定应用问题，也就是工具箱，如信号处理工具箱、控制系统工具箱、神经网络工具箱、模糊逻辑工具箱、通信工具箱、数据采集工具箱以及其他许多特定的工具箱。对于大多数用户，为了能够灵活而高效地使用工具箱，他们通常需要学习相关的专业知识。除了内置函数外，所有主要文档和 MATLAB 工具箱文件都是可读且可更改的。这些工具箱实际就是一套复杂函数，工具箱的应用进一步扩展了 MATLAB 软件的功能。为了能够解决特殊问题，用户可以改变源文件并加入自己的文件以建立新的工具箱。

在 MATLAB 软件成功安装后，以 R2011b 版本为例，首次进入显示的主界面如图 1-1 所示。

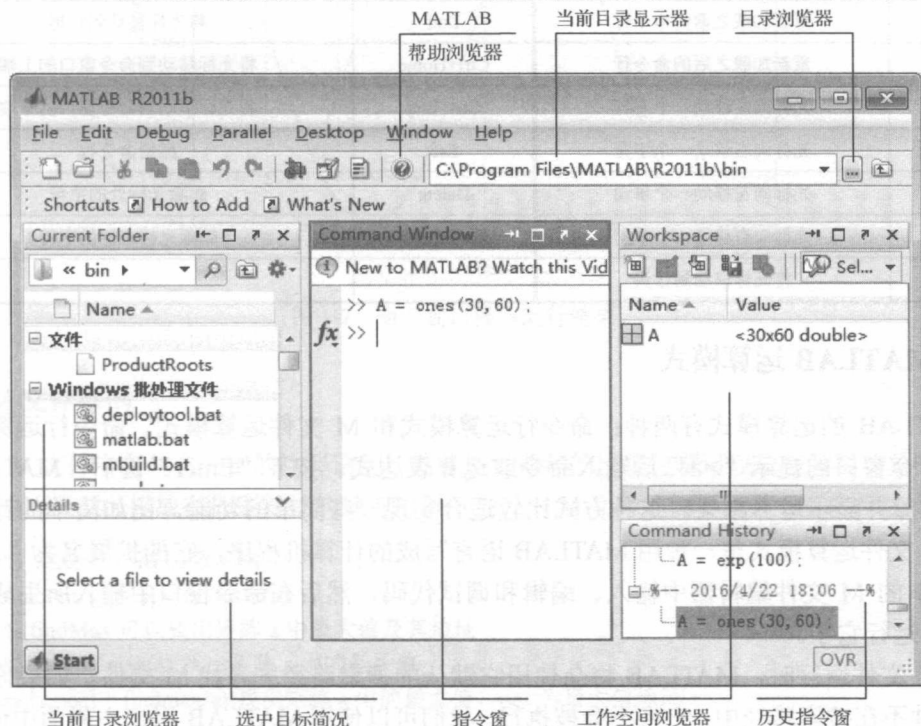


图 1-1 MATLAB 用户界面



(1) 指令窗。MATLAB 操作的最主要窗口。在该窗内，可输入各种 MATLAB 指令、函数、表达式；显示除图形外的所有运算结果；运行错误时，显示相关提示。

(2) 当前目录浏览器。在该浏览器中，展示着子目录、M 文件、MAT 文件和 MDL 文件等。对该界面上的 M 文件，可以直接进行复制、编辑和运行；界面上的 MAT 数据文件，可以直接送入 MATLAB 工作内存。

此外，在当前目录浏览器正下方，还有一个“选中目标简况”窗。该窗显示所选文件的概况信息。比如该窗会展示：M 文件的 H1 行内容，最基本的函数格式；所包含的内嵌函数和其他子函数。

(3) 工作空间浏览器。该窗口罗列出 MATLAB 工作空间中所有的变量名、大小、字节数。在该窗中，可对变量进行观察、编辑、提取和保存。

(4) 历史指令窗。该窗口记录已经运行过的指令、函数、表达式，以及它们运行的日期、时间。该窗中的所有指令、文字都允许复制、重运行及用于产生 M 文件。

1.2 MATLAB 基本操作

MATLAB 提供方便实用的功能键用以在当前或之前的输入命令窗口编辑、修改命令行。这些功能键如表 1-1 所示。

表 1-1 常用功能键

功 能 键	功 能	功 能 键	功 能
↑	重新加载之前的命令行	End	将光标移动到行尾
↓	重新加载之后的命令行	Ctrl+Home	将光标移动到命令窗口的上端
←	光标向左移动一个字符	Ctrl+End	将光标移动到命令窗口的下端
→	光标向右移动一个字符	Esc	撤销命令行
Ctrl+←	光标向左移动一个单词	Delete	删除光标处的字符
Ctrl+→	光标向右移动一个单词	Backspace	删除光标左侧的字符
Home	将光标移动到行头		

1.2.1 MATLAB 运算模式

MATLAB 的运算模式有两种：命令行运算模式和 M 文件运算模式。命令行运算模式是直接在命令窗口的提示“>>”后输入命令或运算表达式。按下“Enter”键后，MATLAB 将会进行运算并显示运算结果。这种方式比较适合实现一些简单的功能，比如简单的计算或画图等。M 文件运算模式是一种用 MATLAB 语言写成的计算机程序，它的扩展名为“.m”。在 MATLAB 的 M 文件编辑器中输入、编辑和调试代码，然后在命令窗口中输入所生成的文件名就可以运行它了。

当 M 文件运行时，MATLAB 将会使用它默认的搜索路径去寻找 M 文件。如果你想运行的 M 文件不在搜索路径中，它将被不会执行。我们可以使用 MATLAB 用户主界面中的“File”菜单下的“set path”命令设置，在 MATLAB 搜索路径中加入我们所需要的文件夹和目录。



1. 命令行运算模式举例

可以在命令窗口中直接输入以下命令实现三角函数绘图。

```
clear;
x = -pi:0.1:pi;
y1 = sin(x);
y2 = cos(x);
plot(x,y1,x,y2);
title('cosine and sine functions');
xlabel('time');
ylabel('Amplitude');
legend('y = cos(x)','y = sin(x)');
grid on;
```

命令窗口操作运行结果如图 1-2 所示。

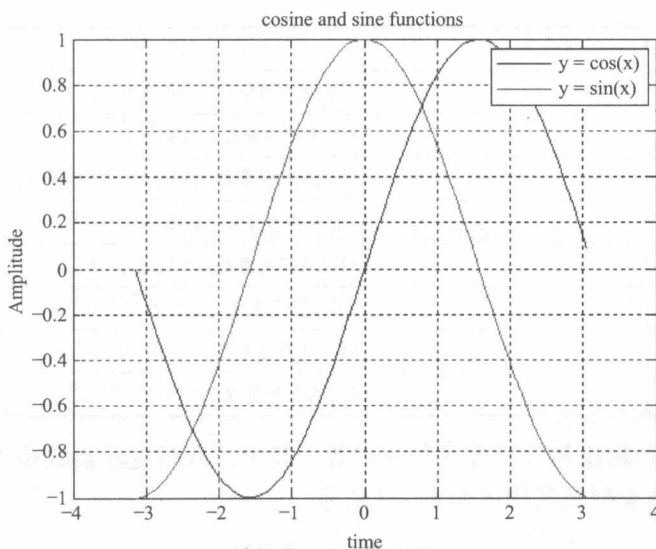


图 1-2 命令窗口操作运行结果

2. M 文件举例

通常 M 文件中会包含一定的注释语句，这些注释语句的出现位置可以放在解释对象的上面、下面或后面，甚至可以放在程序开始的地方，以下为一个 M 文件的例子，其中有多行注释语句。

```
% 这是一个 M 函数示例
function [y,pos] = findmax(a)
% findMax 可以找出矩阵 a 中最大值及其地址
% y = findmax(a):找出矩阵 a 中的最大值
% [y,pos] = findmax(a):找出矩阵 a 中的最大值，pos 为最大值地址
[y,p] = max(a(:));
[r,c] = ind2sub(size(a),p);
```



```
pos = [r,c];
```

1.2.2 数据类型和算术运算

1. 数字、变量和表达式

每种编程语言都有自己的数字、变量和表达式使用约束，MATLAB 变量的描述是十进制形式，十进制的小数点和复数符号可以用在科学计数法中，如 1.3e^{-3} 。MATLAB 可支持 16 位有效数字，从 $10\text{e}^{-308} \sim 10\text{e}^{308}$ 。

数字是数学运算的最基本对象，MATLAB 中定义的数字的数据类型为整数、浮点数和复数三种，另外，还定义了 Inf 和 NaN 两个特殊数值。

MATLAB 支持 8 位、16 位、32 位和 64 位的有符号和无符号整数。这 8 种数据类型及其描述如表 1-2 所示。

表 1-2 整数类型

数据类型	描述
uint 8	8 位无符号整数，范围为 $0 \sim 2^8 - 1$
int8	8 位有符号整数，范围为 $-2^7 \sim 2^8 - 1$
uint16	16 位无符号整数，范围为 $0 \sim 2^{16} - 1$
int16	16 位有符号整数，范围为 $-2^{15} \sim 2^{15} - 1$
uint32	32 位无符号整数，范围为 $0 \sim 2^{32} - 1$
int32	32 位有符号整数，范围为 $-2^{31} \sim 2^{31} - 1$
uint64	64 位无符号整数，范围为 $0 \sim 2^{64} - 1$
int64	64 位有符号整数，范围为 $-2^{63} \sim 2^{63} - 1$

MATLAB 支持单精度和双精度两种浮点数，其中，双精度浮点数是 MATLAB 的默认数据类型。这两种数据类型及其描述如表 1-3 所示。

表 1-3 浮点数类型

数据类型	描述
single	单精度浮点数，范围为 $-3.40282 \times 10^{38} \sim 3.40282 \times 10^{38}$
double	双精度浮点数，范围为 $-1.79769 \times 10^{308} \sim 1.79769 \times 10^{308}$

复数包含实部和虚部，在 MATLAB 中，用 i 或者 j 来表示虚部。

MATLAB 中，Inf 和 -Inf 分别表示正无穷大和负无穷大。除法运算中除数为 0 或者结果溢出都有可能导致 Inf 或 -Inf 的运算结果。类似 1/0 的结果是 Inf。用 NaN (Not a Number) 表示一个既不是实数也不是复数的数值。类似 0/0、Inf/Inf 的结果都是 NaN。

MATLAB 用户自定义变量命名规则：MATLAB 的变量要求区分大小写，首字符要求是英文字母，长度不得超过 31 个字符，可包含英文字母、数字和下画线。但变量名称中不能包含空格或标点符号。

除了用户自定义变量以外，MATLAB 中有一些预定义变量，这些预定义变量具有相应的



初始值，其中比较常用的如表 1-4 所示。

表 1-4 MATLAB 默认预定义变量

预定义变量	含 义	预定义变量	含 义
NaN 或 nan	非数值	ans	最近结果
nargin	函数输入变量个数	Inf 或 inf	无穷大
nargout	函数输出变量个数	i 或 j	虚数单位
realmax	浮点数类型所能表示的正的最大值	pi	圆周率
realmin	浮点数类型所能表示的正的最小值	eps	浮点数精度值

表达式是由数字、算符、数字分组符号（括号）、用户变量和系统变量等组合所得到的。下面给出一个简单的表达式及其运行结果。

```
cosd(45)+tand(30)+sqrt(2)+1
ans =
    3.6987
```

2. 算术运算符和表达式

MATLAB 中的算术运算符如表 1-5 所示。

表 1-5 MATLAB 中的算术运算符

预定义符号	含 义	预定义符号	含 义
+	加号	.^	按元素乘方
-	减号	*	矩阵相乘
.*	按元素相乘	/	解决线性等式 $xA = B$ 中的 x
/	数组右除	\	解决线性等式 $Ax = B$ 中的 x
.\	数组左除	^	矩阵乘方

MATLAB 中的表达式由变量名、运算符和函数名组成。括号具有最高优先级。算术运算的优先级顺序为：乘方>相乘/相除>加法/减法。赋值运算符“=”和其他运算符的旁边可以加入空格，以提高程序的可读性。

算术运算符应用示例如下。

以下运算均针对于 $A=[1,2,3;5,6,7;3,4,9]$ ， $B=[2,3,5;5,2,7;4,6,9]$ 进行描述。

(1) 计算线性等式 $xA = B$ 中的 x 的值。

命令：

```
A=[1,2,3;5,6,7;3,4,9];
B=[2,3,5;5,2,7;4,6,9];
x=B/A
```

结果：

```
x =
```



```
0.6250    0.1250    0.2500
-6.0000    1.0000    2.0000
1.3750    0.3750    0.2500
```

(2) 计算 $3./A$ 。

命令：

```
A=[1,2,3;5,6,7;3,4,9];
C=3./A
```

结果：

```
C =
    3.0000    1.5000    1.0000
    0.6000    0.5000    0.4286
    1.0000    0.7500    0.3333
```

1.2.3 关系和逻辑运算符

MATLAB 与其他的计算机语言一样，不仅有算数运算符，还有关系运算符和逻辑运算符。关系运算符和逻辑运算符分别如表 1-6 和表 1-7 所示。

表 1-6 关系运算符

运 算 符	描 述	运 算 符	描 述
==	判断是否相等	<=	判断是否小于或等于
>=	判断是否大于或等于	<	判断是否小于
>	判断是否大于	~=	判断是否不相等
isequal	判断数组容量是否相等	isequalwithequalnans	判断数组容量是否相等，NaN 也可以作为判断量

表 1-7 逻辑运算符

运算符	描述	运算符	描述
&	“与”运算	any	判断是否任何数组元素非零
~	“非”运算	false	逻辑“0”（“假”）
	“或”运算	find	寻找非零元素的位置
xor	“异或”运算	islogical	判断输入是否为逻辑数组
all	判断是否所有数组元素非零或真	logical	将数字值转为逻辑值

MATLAB 规定：在所有的关系和逻辑表达式中，所有的非零数值都表示“真”，只有 0 表示“假”。

关系运算和逻辑运算的结果为由“0”或“1”组成的逻辑数组。逻辑数组是一种具有特殊数值的数组，它会涉及数值运算和函数调用，同是它也可以表示逻辑结果。

关系运算符应用示例如下。

(1) 在命令窗口输入“A=1:9”，输入以下的命令可以得到对应关系运算的结果。



```
B=10-A,r0=(A<B),r1=(A==B)
```

结果:

```
A=1 2 3 4 5 6 7 8 9
B=9 8 7 6 5 4 3 2 1
r0=1 1 1 1 0 0 0 0 0
r1=0 0 0 0 1 0 0 0 0
```

(2) 显示矩阵 $A=[-1,2,4; -2,5,3;9, -8,3]$ 中值大于 3 的元素。

命令:

```
A=[-1,2,4;-2,5,3;9,-8,3];
A>3*ones(3)
```

结果:

```
0    0    1
0    1    0
1    0    0
```

若一个表达式包括运算变量、算数运算符、关系运算符和逻辑运算符等，则表达式的计算需要遵循一套优先级顺序，MATLAB 首先计算优先级高的运算，再计算优先级低的运算；若优先级相同，则按照从左到右的顺序依次计算。表 1-8 所示为按照优先级从高到低对运算符进行排序。

表 1-8 运算符的优先等级

运算符
圆括号 ()
转置 (.'), 共轭转置 ('), 乘方 (^), 矩阵乘方 (^)
标量加法 (+), 减法 (-), 取反 (~)
乘法 (*), 矩阵乘法 (*), 右除 (/), 左除 (\), 矩阵右除 (/), 矩阵左除 (\)
加法 (+), 减法 (-), 逻辑非 (~)
冒号运算符 (:)
小于 (<), 大于 (>), 小于或等于 (<=), 大于或等于 (>=), 等于 (==), 不等于 (~=)
数组逻辑与 (&)
数组逻辑非 ()
逻辑与 (&&)
逻辑非 ()

MATLAB 支持两种不同的数值运算方式——数组和矩阵运算。其中数组运算指数组对应元素之间的运算，也称为点运算，MATLAB 支持多维数组。数组运算需要输入的数组有相同的大小，否则无法进行运算。而矩阵运算遵循线性变换，并不是简单的多维数组的运算，输入矩阵的维数之间的关系则取决于具体的运算操作，如右除需要两个矩阵有相同的列数，而矩阵相乘则需要前者的列数与后者的行数相等。英文句号 “.” 可用来区分数组运算和矩阵运



算，两种运算中的加减都是相同的，因此不需要将它们写成“+”和“-”。若数组或矩阵运算的操作数中有一个为标量而另外一个不是，那么 MATLAB 将会对其进行标量扩展，使其变为普通的数组或矩阵运算。

表 1-9 给出了数组和矩阵运算的一些区别，本质上的区别是对元素的操作还是对数据整体的操作，数组的概念在其他的编程语言中也有定义，数组与矩阵本质上具有一致性，都是对数据存储和处理的一种方式，这里的数组运算可以看作这个专有的名词，而不要理解为是一种针对数组的运算。

表 1-9 数组和矩阵运算符之间的区别（A、B 为非标量）

数 组 运 算		矩 阵 运 算	
运 算 符	描 述	运 算 符	描 述
*	$A.*B$ 表示 A 与 B 对应元素相乘	*	$A*B$ 表示 A 与 B 按线性代数法则相乘
.^	$A.^B$ 表示 A 中元素按 B 中对应元素次乘方	^	A^B ，若 B 为标量，则为 A 中元素的 B 次乘方；若 B 为非标量，则运算涉及特征值和特征向量
./	$A./B$ 表示 A 中元素除以 B 中对应元素	/	A/B 的结果为 $xA=B$ 的解，A 与 B 必须有相同的列数
.\	$A.\B$ 表示 B 中元素除以 A 中对应元素	\	$A\B$ 表示结果为 $Ax=B$ 的解，A 与 B 必须有相同的行数
.'	A.' 表示 A 的转置	'	A' 表示 A 的共轭转置

以下为数组与矩阵运算举例，其中的“命令”表示在命令窗口直接输入。这里需要注意，在输入矩阵时，由于矩阵具有多行多列，要注意元素之间的区分，同行元素间用逗号或空格隔开，不同的行由分号“;”或用回车键隔开。命令输入完毕，回车表示代码执行命令。

(1) 命令：

```
a=[1,2,3]+[3 2 1]*i          %%% 输入行向量
```

结果：

```
a=1.0000+3.0000i      2.0000+2.0000i      3.0000+1.0000i
```

(2) 命令：

```
b=a'                    %%% 对行向量 a 共轭转置
```

结果：

```
b=
1.0000-3.0000i
2.0000-2.0000i
3.0000-1.0000i
```

(3) 命令：

```
c=b*a                    %%% 矩阵 a 与 b 相乘
```



结果:

c=

10.0000	8.0000-4.0000i	6.0000-8.0000i
8.0000+4.0000i	8.0000	8.0000-4.0000i
6.0000+8.0000i	8.0000+4.0000i	10.0000

(4) 命令:

d=a.'

%%% 转置

结果:

d=

1.0000+3.0000i
2.0000+2.0000i
3.0000+1.0000i

(5) 命令:

e=c*b

%%% 矩阵相乘

结果:

e=

28.0000-84.0000i
56.0000-56.0000i
84.0000-28.0000i

(6) 命令:

f=exp(c)

%%% 元素指数运算

结果:

f=

1.0e+004*		
2.2026	-0.1948+0.2256i	-0.0059-0.0399i
-0.1948-0.2256i	0.2981	-0.1948+0.2256i
-0.0059+0.0399i	-0.1948-0.2256i	2.2026

(7) 命令:

g=expm(c)

%%% 矩阵指数运算

结果:

g=

1.0e+011*		
5.1652+0.0000i	4.1322-2.0661i	3.0991-4.1322i
4.1322+2.0661i	4.1322+0.0000i	4.1322-2.0661i
3.0991+4.1322i	4.1322+2.0661i	5.1652+0.0000i

(8) 对于如下矩阵: