

❖ 高等院校通信与信息专业规划教材 ❖

语音信号处理 实验教程

EXPERIMENTAL COURSE ON
SPEECH SIGNAL PROCESSING



梁瑞宇 赵力 魏昕 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

赠送MATLAB仿真程序

高等院校通信与信息专业规划教材

语音信号处理实验教程

梁瑞宇 赵 力 魏 昕 编著



机械工业出版社

本书为《语音信号处理（第3版）》的配套实验教程。该教材阐述了语音信号处理的基本理论，并基于 MATLAB 软件介绍了语音信号处理的实现方法和关键技术。本书共分13章，内容包括：MATLAB 基础教程、语音信号处理基础实验、语音信号分析实验、语音信号特征提取实验、语音增强实验、语音编码实验、语音合成与转换实验、语音隐藏实验、声源定位实验、语音识别实验、说话人识别实验、语音情感识别实验、实用语音信号处理平台。

本书可作为高等院校的教材用书或教学参考用书，同时也可供从事语音信号处理等领域的工程技术人员参考。

本书提供 MATLAB 仿真程序，读者可登录机械工业出版社教育服务网（www.cmpedu.com）注册并审核通过后下载。

图书在版编目（CIP）数据

语音信号处理实验教程 / 梁瑞宇，赵力，魏昕编著. —北京：机械工业出版社，2016.2

高等院校通信与信息专业规划教材

ISBN 978-7-111-53071-8

I. ①语… II. ①梁… ②赵… ③魏… III. ①语音信号处理—高等学校—教材 IV. ①TN912.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2016）第 037809 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

责任编辑：李馨馨 责任校对：张艳霞

责任印制：李 洋

北京振兴源印务有限公司印刷

2016 年 3 月第 1 版·第 1 次印刷

184mm×260mm·19 印张·466 千字

0001—2500 册

标准书号：ISBN 978-7-111-53071-8

定价：45.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线：（010）88379833

机工官网：www.cmpbook.com

读者购书热线：（010）88379649

机工官博：weibo.com/cmp1952

教育服务网：www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

金 书 网：www.golden-book.com

前 言

语音信号处理是研究用数字信号处理技术对语音信号进行处理的一门学科，它是在多门学科基础上发展起来的综合性技术，涉及语音学、语言学、生理学及认知科学、数字信号处理、模式识别和人工智能等许多学科领域。同时语音信号处理也是目前发展最为迅速的信息科学技术之一，其研究涉及一系列前沿课题。

根据教育部加强学生实践能力培养的要求，本书立足于语音信号基本理论，辅以 MATLAB 实现，使读者在学习理论知识的同时，能快速实践，提高学习兴趣，增强解决问题的能力。

本书是机械工业出版社出版的《语音信号处理（第3版）》的配套实验教材（也可独立作为实验教材使用）。作者基于多年从事语音信号处理研究的成果，在阐述理论知识的同时，配以 MATLAB 程序，并加上详细的注释。教材的编写由浅及深，验证性实验与设计性实验并重，同时适合初学者和有一定基础的研究者使用。

本书共分 13 章，第 1 章是 MATLAB 基础教程；第 2 章是语音信号处理基础实验；第 3 章是语音信号分析实验；第 4 章是语音信号特征提取实验；第 5 章是语音增强实验；第 6 章是语音编码实验；第 7 章是语音合成与转换实验；第 8 章是语音隐藏实验；第 9 章是声源定位实验；第 10 章是语音识别实验；第 11 章是说话人识别实验；第 12 章是语音情感识别实验；第 13 章介绍了本研究团队开发的实用语音信号处理平台。

本书主要面向信号与信息处理、电路与系统、通信与电子工程、模式识别与人工智能、计算机信息处理等学科有关专业的高年级学生和研究生，也可以作为从事语音信号处理这一领域科研工作的技术人员参考书。

本书的参考学时为本科生 32 学时、研究生 40 学时，可以根据不同的教学要求对其内容进行适当取舍，灵活安排讲课学时数。

本书主要由梁瑞宇、赵力、魏昕编写，其中，1~9 章由梁瑞宇编写，12~13 章由赵力编写，10~11 章由魏昕编写，全书由梁瑞宇统稿。广州大学的邹采荣教授主审了全书，并提出很多宝贵意见，在此表示诚挚的感谢。

语音信号处理是一门理论性强、实用面广、内容新、难度大的交叉学科，同时这门学科又处于快速发展之中，尽管作者在编写过程中始终注重理论紧密联系实际，力求以尽可能简明、通俗的语言，深入浅出、通俗易懂地将这门学科介绍给读者，但因作者水平有限，缺点错误在所难免，敬请广大读者批评指正。

编 者

目 录

前言

第1章 MATLAB 基础教程	1
1.1 MATLAB 简介	1
1.1.1 功能和特点	1
1.1.2 通用操作界面窗口	1
1.1.3 文件格式	3
1.2 MATLAB 数值计算	3
1.2.1 数据类型	3
1.2.2 变量	4
1.2.3 矩阵和数组	4
1.2.4 字符串	6
1.2.5 数学函数	6
1.2.6 关系逻辑	7
1.3 MATLAB 绘图功能	7
1.3.1 二维曲线的绘制	7
1.3.2 MATLAB 的三维图形绘制	12
1.3.3 立体图形与图轴的控制	13
1.4 MATLAB 的特殊图形绘制	13
1.4.1 条形图	13
1.4.2 直方图	13
1.4.3 饼图	14
1.4.4 对数坐标和极坐标图	14
1.4.5 对话框	14
1.4.6 句柄图形	15
1.5 MATLAB 程序设计	15
1.5.1 M 文件	15
1.5.2 程序流程控制	16
1.5.3 函数调用和参数传递	18
1.6 MATLAB 设计实例——FFT 频谱分析	19
1.6.1 FFT 基础	19
1.6.2 基于 FFT 的信号频谱分析	19
第2章 语音信号处理基础实验	24
2.1 语音采集与读写实验	24

2.1.1 实验目的	24
2.1.2 实验原理	24
2.1.3 实验步骤及要求	28
2.1.4 思考题	29
2.1.5 参考例程	29
2.2 语音编辑实验	30
2.2.1 实验目的	30
2.2.2 实验原理	30
2.2.3 实验步骤	32
2.2.4 思考题	33
2.2.5 参考例程	34
2.3 声强与响度实验	34
2.3.1 实验目的	34
2.3.2 实验原理	35
2.3.3 实验步骤及要求	38
2.3.4 思考题	38
2.3.5 参考例程	38
2.4 语音信号生成的数学模型	39
2.4.1 实验目的	39
2.4.2 实验原理	39
2.4.3 实验步骤及要求	43
2.4.4 思考题	43
2.4.5 参考例程	43
2.5 语音信号的预处理	45
2.5.1 实验目的	45
2.5.2 实验原理	45
2.5.3 实验步骤及要求	49
2.5.4 思考题	50
2.5.5 参考例程	50
第3章 语音信号分析实验	51
3.1 语音分帧与加窗	51
3.1.1 实验目的	51
3.1.2 实验原理	51
3.1.3 实验步骤及要求	53
3.1.4 思考题	54
3.1.5 参考例程	54
3.2 短时频域分析	54
3.2.1 实验目的	54
3.2.2 实验原理	54

3.2.3 实验步骤及要求	56
3.2.4 思考题	58
3.2.5 参考例程	58
3.3 短时频域分析	60
3.3.1 实验目的	60
3.3.2 实验原理	60
3.3.3 实验步骤及要求	62
3.3.4 思考题	62
3.3.5 参考例程	62
3.4 倒谱分析与 MFCC 系数	62
3.4.1 实验目的	62
3.4.2 实验原理	63
3.4.3 实验步骤及要求	67
3.4.4 思考题	69
3.4.5 参考例程	69
3.5 线性预测分析	70
3.5.1 实验目的	70
3.5.2 实验原理	70
3.5.3 实验步骤及要求	75
3.5.4 思考题	77
3.5.5 参考例程	77
3.6 线谱对转换实验	78
3.6.1 实验目的	78
3.6.2 实验原理	78
3.6.3 实验步骤及要求	82
3.6.4 思考题	83
3.6.5 参考例程	83
第4章 语音信号特征提取实验	84
4.1 语音端点检测实验	84
4.1.1 实验目的	84
4.1.2 实验原理	84
4.1.3 实验步骤及要求	90
4.1.4 思考题	94
4.1.5 参考例程	94
4.2 基音周期检测实验	95
4.2.1 实验目的	95
4.2.2 实验原理	96
4.2.3 实验步骤及要求	100
4.2.4 思考题	102



4.2.5 参考例程	102
4.3 共振峰估计实验	103
4.3.1 实验目的	103
4.3.2 实验原理	103
4.3.3 实验步骤及要求	107
4.3.4 思考题	109
4.3.5 参考例程	110
第5章 语音增强实验	111
5.1 基于自适应滤波器法的语音降噪实验	111
5.1.1 实验目的	111
5.1.2 实验原理	111
5.1.3 实验步骤及要求	115
5.1.4 思考题	116
5.1.5 参考例程	116
5.2 基于谱减法的语音降噪实验	116
5.2.1 实验目的	116
5.2.2 实验原理	117
5.2.3 实验步骤及要求	118
5.2.4 思考题	120
5.2.5 参考例程	120
5.3 基于维纳滤波的语音降噪实验	121
5.3.1 实验目的	121
5.3.2 实验原理	121
5.3.3 实验步骤及要求	123
5.3.4 思考题	125
5.3.5 参考例程	125
5.4 基于小波分解的语音降噪实验	126
5.4.1 实验目的	126
5.4.2 实验原理	126
5.4.3 实验步骤及要求	129
5.4.4 思考题	130
5.4.5 参考例程	130
第6章 语音编码实验	132
6.1 PCM 编解码实验	132
6.1.1 实验目的	132
6.1.2 实验原理	132
6.1.3 实验步骤及要求	134
6.1.4 思考题	135
6.1.5 参考例程	135

6.2	LPC 编解码实验	136
6.2.1	实验目的	136
6.2.2	实验原理	136
6.2.3	实验步骤及要求	138
6.2.4	思考题	139
6.2.5	参考例程	139
6.3	ADPCM 编解码实验	141
6.3.1	实验目的	141
6.3.2	实验原理	141
6.3.3	实验步骤及要求	143
6.3.4	思考题	144
6.3.5	参考例程	144
第7章	语音合成与转换实验	146
7.1	帧合并实验	146
7.1.1	实验目的	146
7.1.2	实验原理	146
7.1.3	实验步骤及要求	152
7.1.4	思考题	153
7.1.5	参考例程	153
7.2	基于线性预测的语音合成实验	154
7.2.1	实验目的	154
7.2.2	实验原理	154
7.2.3	实验步骤及要求	155
7.2.4	思考题	156
7.2.5	参考例程	156
7.3	基于共振峰检测和基音参数的语音合成实验	157
7.3.1	实验目的	157
7.3.2	实验原理	157
7.3.3	实验步骤及要求	159
7.3.4	思考题	160
7.3.5	参考例程	160
7.4	语音信号的变调与变速实验	162
7.4.1	实验目的	162
7.4.2	实验原理	162
7.4.3	实验步骤及要求	166
7.4.4	思考题	167
7.4.5	参考例程	167
第8章	语音隐藏实验	170
8.1	LSB 语音信息隐藏实验	170



8.1.1	实验目的	170
8.1.2	实验原理	170
8.1.3	实验步骤及要求	172
8.1.4	思考题	173
8.1.5	参考例程	173
8.2	回声法语音信息隐藏实验	174
8.2.1	实验目的	174
8.2.2	实验原理	174
8.2.3	实验步骤及要求	176
8.2.4	思考题	177
8.2.5	参考例程	178
第9章	声源定位实验	180
9.1	简单房间回响模型	180
9.1.1	实验目的	180
9.1.2	实验原理	180
9.1.3	实验步骤及要求	182
9.1.4	思考题	183
9.1.5	参考例程	183
9.2	基于广义互相关的声源定位实验	185
9.2.1	实验目的	185
9.2.2	实验原理	185
9.2.3	实验步骤及要求	188
9.2.4	思考题	189
9.2.5	参考例程	189
9.3	基于空间谱估计的声源定位实验	191
9.3.1	实验目的	191
9.3.2	实验原理	191
9.3.3	实验步骤及要求	199
9.3.4	思考题	199
9.3.5	参考例程	200
第10章	语音识别实验	202
10.1	基于动态时间规整 (DTW) 的孤立字语音识别实验	202
10.1.1	实验目的	202
10.1.2	实验原理	202
10.1.3	实验步骤及要求	206
10.1.4	思考题	207
10.1.5	参考例程	207
10.2	基于隐马尔可夫模型 (HMM) 的孤立字语音识别实验	208
10.2.1	实验目的	208

10.2.2	实验原理	208
10.2.3	实验步骤及要求	213
10.2.4	思考题	217
10.2.5	参考例程	218
第 11 章	说话人识别实验	219
11.1	基于矢量量化 (VQ) 的说话人识别实验	219
11.1.1	实验目的	219
11.1.2	实验原理	219
11.1.3	实验步骤及要求	222
11.1.4	思考题	224
11.1.5	参考例程	224
11.2	基于高斯混合模型 (GMM) 的说话人识别实验	225
11.2.1	实验目的	225
11.2.2	实验原理	225
11.2.3	实验步骤和实验结果	227
11.2.4	思考题	229
11.2.5	参考例程	230
第 12 章	语音情感识别实验	231
12.1	基于 K 近邻分类算法的语音情感识别实验	231
12.1.1	实验目的	231
12.1.2	实验原理	231
12.1.3	实验步骤及要求	235
12.1.4	思考题	236
12.1.5	参考例程	236
12.2	基于神经网络的语音情感识别	240
12.2.1	实验目的	240
12.2.2	实验原理	240
12.2.3	实验步骤及要求	247
12.2.4	思考题	249
12.2.5	参考例程	249
12.3	基于支持向量机的语音情感识别	250
12.3.1	实验目的	250
12.3.2	实验原理	250
12.3.3	实验步骤及要求	254
12.3.4	思考题	255
12.3.5	参考例程	255
12.4	基于特征降维的语音情感识别	256
12.4.1	实验目的	256
12.4.2	实验原理	256



12.4.3 实验步骤及要求	262
12.4.4 思考题	263
12.4.5 参考例程	263
第13章 实用语音信号处理平台	266
13.1 基于MFC的语音信号处理软件平台	266
13.1.1 基于MFC的语音信号处理软件平台	266
13.1.2 语音开发软件平台	269
13.2 基于嵌入式Linux的音频驱动程序移植	272
13.2.1 高级Linux声音架构	272
13.2.2 Platform 功能和数据解析	273
13.2.3 Codec 功能和数据解析	274
13.2.4 WM8960 驱动移植	275
13.3 实时语音信号处理硬件平台	281
13.3.1 平台架构与资源	281
13.3.2 基于QT的语音信号处理	282
参考文献	290

第1章 MATLAB 基础教程

1.1 MATLAB 简介

1.1.1 功能和特点

MATLAB 是 MathWorks 公司开发的科学与工程计算软件,广泛应用于自动控制、数学运算、信号分析、计算机技术、图像信号处理、财务分析、航天工业、汽车工业、生物医学工程、语音处理和雷达工程等行业,是国内外高校和研究部门科学研究的重要工具。

MATLAB 的特点包括:

1) 功能强大。MATLAB 的数值运算主要针对矩阵设计和优化,包括加、减、乘、除、函数运算等多种数学运算;自带符号工具箱,可以解决在数学、应用科学和工程计算领域中常常遇到的符号计算问题;大量针对各专业应用的工具箱的提供,使 MATLAB 适用于不同领域;MATLAB 的 Notebook 为用户提供了强大的文字处理功能,允许用户从 Word 访问 MATLAB 的数值计算和可视化结果。

2) 人机界面友好,编程效率高。MATLAB 的语言规则与笔算式相似,命令表达方式与标准的数学表达式非常相近。MATLAB 的程序设计基于解释方式实现,算式无需编译即可得出结果,并能针对错误即时反馈,便于编程者改正。

3) 强大而智能化的作图功能。MATLAB 包含多种坐标系,可以绘制三维坐标中的曲线和曲面,使工程计算的结果可视化,使原始数据的关系清晰化。

4) 可扩展性强。MATLAB 软件包括基本部分和工具箱两大部分,工具箱可以任意增减,具有良好的可扩展性。

5) Simulink 动态仿真功能。MATLAB 的 Simulink 提供了动态仿真的功能,用户通过绘制框图来模拟一个线性、非线性、连续或离散的系统,并由 Simulink 实现仿真和系统分析。

1.1.2 通用操作界面窗口

MATLAB R2010a 版的 MATLAB 工作界面如图 1-1 所示。界面的上层铺放着几个最常用的部分:指令窗(Command Window)、当前目录(Current Directory)浏览器、工作内存(Workspace)浏览器、历史指令(Command History)窗等。

1. 指令窗

指令窗是进行各种 MATLAB 操作的最主要窗口。在窗口内,使用者可键入各种 MATLAB 指令、函数、表达式。窗口可显示除图形外的所有运算结果,并在运行错误时,给出相关的出错提示。指令窗常用命令如表 1-1 所示。

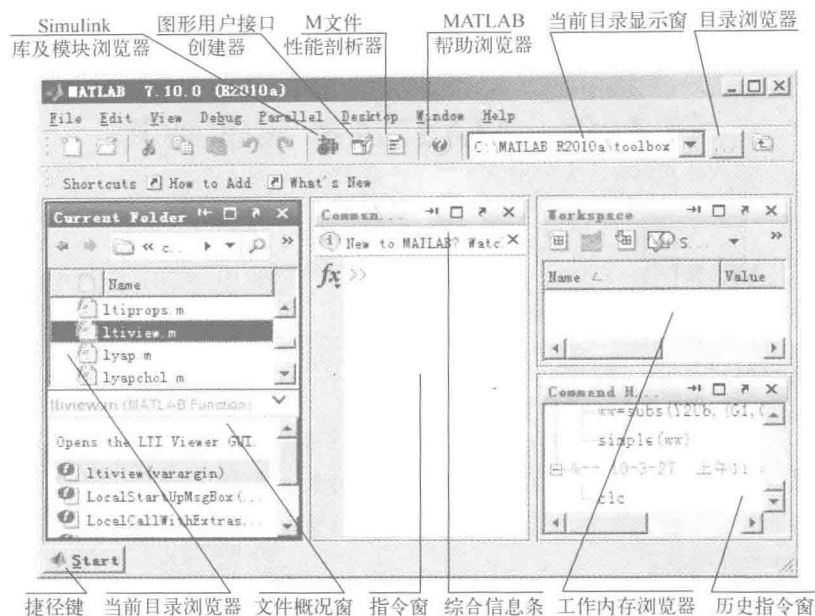


图 1-1 MATLAB 工作界面概貌

表 1-1 指令窗常用命令

命 令 名	作 用
↑/↓	向前/向后调回已输入的命令
close all	关闭所有的图形窗口
clc	清除命令窗口中的内容
clear	从工作空间清除所有的变量
save	保存工作区间里的变量到磁盘文件
load	导入磁盘里的变量文件到工作空间
format type	输出数据格式显示控制命令
addpath	将一个新目录名添加到 MATLAB 的搜索路径里
rmpath	将某个目录从 MATLAB 搜索路径中清除
help <函数名>	在命令窗口显示 MATLAB 函数的帮助
whos	列出当前工作区间的所有变量，并显示变量的大小、类型及其所占用的存储空间

2. 当前目录浏览器

该浏览器用来展示 MATLAB 的子目录、M 文件、MAT 文件和 MDL 文件等。界面上的 M 文件，可直接进行复制、编辑和运行；界面上的 MAT 数据文件，可直接送入 MATLAB 工作内存；该界面上的子目录，可进行 Windows 平台的各种标准操作。

此外，在当前目录浏览器正下方，还有一个“文件概况窗”，用于显示所选文件的概况信息，如 M 文件所包含的内嵌函数和其他子函数。

3. 工作内存浏览器

窗口里罗列了 MATLAB 工作空间中所有变量的变量名、大小、字节数，可对变量进行观察、图示、编辑、提取和保存。

4. 历史指令窗

该窗记录已经运作过的指令、函数、表达式，及它们运行的日期、时间。窗口中的所有指令、文字都允许复制、重运行及用于产生 M 文件。

5. 捷径键

捷径键用于引出通往 MATLAB 所包含的各种组件、模块库、图形用户界面、帮助分类目录、演示算例等的捷径，以及向用户提供自建快捷操作的环境。

1.1.3 文件格式

1. 程序文件

程序文件即 M 文件，其文件的扩展名为 .m，包括主程序和函数文件。MATLAB 的各工具箱中的函数大部分是 M 文件，M 文件通过 M 文件编辑/调试器生成。

2. 数据文件

数据文件即 MAT 文件，其文件的扩展名为 .mat，用来保存工作空间的数据变量，数据文件可以通过在命令窗口中输入“save”命令生成。

3. 可执行文件

可执行文件即 MEX 文件，其文件的扩展名为 .mex，由 MATLAB 的编译器对 M 文件进行编译后产生，其运行速度比直接执行 M 文件快得多。

4. 图形文件

图形文件的扩展名为 .fig，可以在“File”菜单中创建和打开，也可由 MATLAB 的绘图命令和图形用户界面窗口产生。

5. 模型文件

模型文件扩展名为 .mdl，是由 Simulink 工具箱建模生成的。

1.2 MATLAB 数值计算

1.2.1 数据类型

MATLAB 中共有 15 种基本数据类型和 2 种自定义类型。MATLAB 数据类型关系如图 1-2 所示。

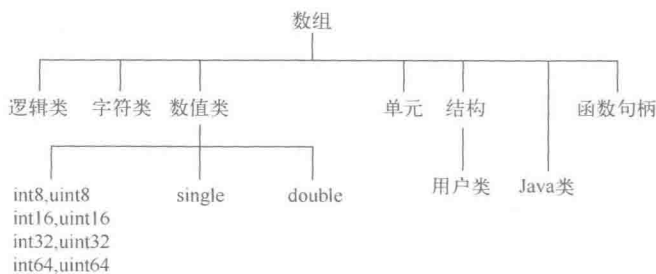


图 1-2 MATLAB 数据类型关系

MATLAB 的实数数据表达方式有两类：带小数点的形式直接表示和科学计数法，如 -2、5.67、2.56e-56。

MATLAB 的复数数据用特殊变量“i”和“j”来表示，这里 i 和 j 代表 $\sqrt{-1}$ 。复数可表示为 $z = a + b * i$ 或 $z = a + b * j$ 。

1.2.2 变量

MATLAB 中所有的变量都是用矩阵形式来表示的，即所有的变量都表示一个矩阵或者一个向量。其命名规则如下：

- 1) 变量名对大小写敏感。
- 2) 变量名必须以英文字母开头，其长度不能超过 63 个字符。
- 3) 变量名可以包含下连字符、数字，但不能包含空格符、标点。
- 4) 关键字不能作为变量名。

此外，当 MATLAB 启动时，MATLAB 的一些特殊变量会驻留在内存中。常用的特殊变量如表 1-2 所示。

表 1-2 特殊变量表

特殊变量	取值	特殊变量	取值
pi	圆周率 π	i 或 j	$i = j = \sqrt{-1}$
eps	计算机的最小数	flops	浮点运算数
inf	无穷大，如 1/0	NaN 或 nan	非数，如 0/0、 ∞/∞ 、 $0 \times \infty$
nargin	函数的输入变量数目	nargout	函数的输出变量数目
realmin	最小的可用正实数	realmax	最大的可用正实数

1.2.3 矩阵和数组

MATLAB 最基本也是最重要的功能就是进行实数或复数矩阵的运算。矩阵元素都是用方括号（[]）括住，每行内的元素间用逗号或空格隔开，行与行之间用分号或回车键隔开，元素可以是数值或表达式。矩阵的常用生成方式如表 1-3 所示。

表 1-3 矩阵生成方式

生成方式	实例	结果
显式元素列表输入	<code>c = [1 2;3 4;5 3 * 2]</code>	3 × 2 矩阵
from;step;to 方式	<code>c = 1:0.5:2</code>	<code>c = [1 1.5 2]</code>
linspace 或 logspace	<code>c = linspace(1,6,3)</code>	<code>c = [1 3.5 6]</code>
矩阵生成函数	如表 1-4 所示	
MAT 数据文件加载	load 命令	

MATLAB 提供了很多能够产生特殊矩阵的函数，各函数的功能如表 1-4 所示。

表 1-4 矩阵生成函数

函 数 名	功 能	实 例	
		输 入	结 果
zeros(m,n)	产生 $m \times n$ 的全 0 矩阵	zeros(2,3)	ans = 0 0 0 0 0 0
ones(m,n)	产生 $m \times n$ 的全 1 矩阵	ones(2,3)	ans = 1 1 1 1 1 1
rand(m,n)	产生均匀分布的随机矩阵 (元素值小于 1.0)	rand(2,3)	ans = 0.9501 0.6068 0.8913 0.2311 0.4860 0.7621
randn(m,n)	产生正态分布的随机矩阵	randn(2,3)	ans = -0.4326 0.1253 -1.1465 -1.6656 0.2877 1.1909
magic(N)	产生 N 阶魔方矩阵(矩阵 的行、列和对角线上元素的和 相等)	magic(3)	ans = 8 1 6 3 5 7 4 9 2
eye(m,n)	产生 $m \times n$ 的单位矩阵	eye(3)	ans = 1 0 0 0 1 0 0 0 1

矩阵和 multidimensional arrays 都是由多个元素组成的, 每个元素通过下标来标识。矩阵中的元素可以用全下标方式标识, 即由行下标和列下标表示, 一个 $m \times n$ 的 a 矩阵的第 i 行第 j 列的元素表示为 $a(i,j)$ 。矩阵运算有明确而严格的数学规则, 矩阵运算规则是按照线性代数运算法则定义的。数组运算是按数组的元素逐个进行的。矩阵或数组的基本运算如表 1-5 所示。

表 1-5 矩阵和数组运算对比表

数 组 运 算		矩 阵 运 算	
命 令	含 义	命 令	含 义
A + B	对应元素相加	A + B	与数组运算相同
A - B	对应元素相减	A - B	与数组运算相同
S * B	标量 S 分别与 B 元素的积	S * B	与数组运算相同
A . * B	数组对应元素相乘	A * B	内维相同矩阵的乘积
S ./ B	S 分别被 B 的元素左除	S \ B	B 矩阵分别左除 S
A ./ B	A 的元素被 B 的对应元素除	A / B	A 的逆阵与 B 相乘
B \ A	结果一定与上行相同	B \ A	A 左除 B
A . ^ S	A 的每个元素自乘 S 次	A ^ S	A 矩阵为方阵时, 自乘 S 次
A . ^ S	S 为小数时, 对 A 各元素分别求非整数幂, 得出矩阵	A ^ S	S 为小数时, 方阵 A 的非整数幂方
S . ^ B	分别以 B 的元素为指数求幂值	S ^ B	B 为方阵时, 标量 S 的矩阵乘方
A . '	非共轭转置	A'	共轭转置
exp(A)	以自然数 e 为底, 分别以 A 的元素为指数求幂	expm(A)	A 的矩阵指数函数
log(A)	对 A 的各元素求对数	logm(A)	A 的矩阵对数函数
sqrt(A)	对 A 的各元素求平方根	sqrtm(A)	A 的矩阵平方根函数
f(A)	求 A 各个元素的函数值	funm(A, 'f')	矩阵的函数运算