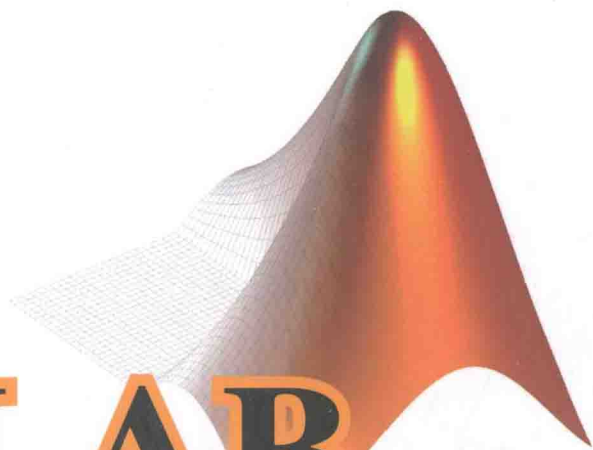


马向国 刘同娟 陈军 编著



MATLAB & Multisim

电工电子技术仿真应用

清华大学出版社

MATLAB & Multisim

电工电子技术仿真应用

马向国 刘同娟 陈军 编著

内 容 简 介

全书分上、下两篇共 10 章。上篇为 MATLAB 电工技术仿真应用,共 5 章,内容包括 MATLAB 仿真基础,MATLAB 在电路中的基本应用,MATLAB 在直流稳态电路中的仿真应用,MATLAB 在动态电路中的仿真应用,MATLAB 在正弦交流电路中的仿真应用;下篇为 Multisim 电子技术及电力电子仿真应用,共 5 章,内容包括 Multisim 仿真基础,Multisim 在模拟电路中的仿真应用,Multisim 在数字电路中的仿真应用,Multisim 在电力电子技术中的应用,Multisim 在电子技术课程设计中的应用。

本书可作为电气工程、电子工程、自动化、控制工程、机电、测控技术与仪器、计算机等专业本科生、研究生教材,也可供教师以及广大科研工作人员参考。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

MATLAB&Multisim 电工电子技术仿真应用/马向国,刘同娟,陈军编著. —北京:清华大学出版社,2013

ISBN 978-7-302-33392-0

I. ①M… II. ①马… ②刘… ③陈… III. ①电子电路—计算机仿真—应用软件 IV. ①TN702

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 180822 号

责任编辑:张占奎

封面设计:傅瑞学

责任校对:王淑云

责任印制:何 芊

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:北京鑫海金澳胶印有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:19.5

字 数:474 千字

版 次:2013 年 11 月第 1 版

印 次:2013 年 11 月第 1 次印刷

印 数:1~2500

定 价:42.00 元

产品编号:038961-01

MATLAB 是 1984 年由美国的 MathWorks 公司推出的产品,是国际科学界应用和影响最广泛的三大计算机数学语言之一。随着版本的不断升级,其功能也愈来愈强大,目前,它已经成为一个集数值分析、矩阵运算、程序设计、系统建模、图形显示、系统仿真于一体的,使用方便、用户界面友好的可视化软件,被广泛地应用于信号与图像处理、控制系统设计、计算机应用、通信仿真等诸多领域。

Multisim 是 Interactive Image Technologies(Electronics Workbench)公司推出的以 Windows 为基础的仿真工具,该软件提供了具有多种测试仪器、元器件品种齐全的虚拟电子工作平台,由此摆脱了实验室条件的限制。通过计算机用该软件对学生进行有关虚拟测试仪器使用、电路设计与仿真、性能分析、时序测试等训练,具有丰富的仿真分析能力。

MATLAB 及 Multisim 软件于 20 世纪 90 年代在中国开始流行,目前已经成为广大科研工作者进行科学研究、工程计算以及系统分析与设计的必备工具。在电工、电子电路及电力电子电路系统设计之前,对仿真结果分析并调整相关参数可达到设计目的,并缩短系统开发时间。全书从实用角度出发,通过大量典型实例,对 MATLAB 和 Multisim 的功能、操作及其在电工、电子技术和电力电子技术中的应用进行了详细论述,与课本理论知识相呼应,每个知识点有一个仿真实例,便于学生自行验证、理解以及灵活运用理论知识点的内容,做到理论和实践相结合。书中涉及的大部分内容和例子我们已在本科生教学过程中进行了验证。

全书分上、下两篇共 10 章。上篇共 5 章,介绍了 MATLAB 电工技术仿真应用,其中第 1 章是 MATLAB 的仿真基础,介绍了 MATLAB 的基本特点、开发环境、数值计算功能、应用 MATLAB 进行程序设计以及自带的功能非常强大的仿真集成环境 Simulink,本章是后续章节的基础;第 2~5 章介绍了 MATLAB 在电工技术中的基本应用、直流稳态电路的仿真分析、动态电路的时域仿真分析和正弦交流电路的仿真分析,每一章都列举了大量实例,每个实例同时用 M 文件和 Simulink 进行建模仿真,并对两种方法结果进行验证比较。下篇共 5 章,介绍了 Multisim 电子技术及电力电子仿真应用,其中第 6~8 章介绍了 Multisim 软件的开发环境、在模拟电路中的仿真应用以及在数字电路中的仿真应用;第 9 章介绍了 Multisim 在电力电子技术仿真中的应用;第 10 章结合实践教学的要求和特点,讲述了 Multisim 在电子技术课程设计中的应用。

该书内容深入浅出,涵盖面广,具有丰富的实例,非常适合本科生、研究生和教师以及广大科研工作者作为参考用书。本书各章节之间既有联系,又相对独立,读者可根据需要选择阅读。每章后面都附有作者精心挑选的思考题,可帮助读者进一步巩固所学知识。

本书由马向国统稿并编写第5~9章,第1~4章由刘同娟编写,第10章由陈军编写。本书在编写过程中得到了北京物资学院物流学院和信息学院领导以及郑州大学西亚斯国际学院电子信息工程学院领导及同事的热情支持,在此一并表示感谢。

本书在编写的过程中,参考了大量的资料和文献,在此对这些资料的作者深表谢意。

由于 MATLAB 和 Multisim 软件涉及面宽,编写时间仓促,加之作者水平和经验有限,书中难免有错漏之处,恳请读者批评指正,以使我们在未来的教学和科研工作中不断改进。作者电子邮箱 mxgl05@163.com, ltj7905@163.com。

编 者

2012 年 10 月

目 录

● 上篇 MATLAB 电工技术仿真应用 ●

第 1 章 MATLAB 仿真基础 3

1.1 MATLAB 概述 3

1.1.1 初识 MATLAB 3

1.1.2 MATLAB 的特点 4

1.2 MATLAB 数值与运算 5

1.2.1 变量与赋值 5

1.2.2 MATLAB 常用数学函数 7

1.2.3 矩阵运算 9

1.3 MATLAB 程序设计 15

1.3.1 M 文件 16

1.3.2 控制流 19

1.3.3 变量和函数种类 20

1.4 Simulink 基础 22

1.4.1 Simulink 概述 22

1.4.2 Simulink 模型创建 26

1.4.3 Simulink 仿真的运行 36

第 2 章 MATLAB 在电路中的基本应用 41

2.1 基本电气元件 41

2.1.1 电阻、电感和电容元件 42

2.1.2 电源元件 43

2.1.3 测量元件 48

2.1.4 连接元件 50

2.1.5 电机元件 50

2.2 电路的 MATLAB/Simulink 设计仿真 52

2.3 电路的 MATLAB M 文件建模仿真 56

2.3.1 MATLAB 程序的基本设计原则 56

2.3.2 电路方程的 MATLAB 求解方法 56

2.3.3 电路的 MATLAB M 文件建模仿真步骤 60

第 3 章	MATLAB 在直流稳态电路中的仿真应用	63
3.1	电路定理	63
3.1.1	叠加原理	63
3.1.2	戴维南定理	65
3.1.3	诺顿定理	66
3.2	电路分析方法	67
3.2.1	支路电流法	67
3.2.2	网孔电流法	68
3.2.3	节点电压法	70
3.3	直流稳态电路的 MATLAB 建模仿真	72
第 4 章	MATLAB 在动态电路中的仿真应用	80
4.1	概述	80
4.2	一阶电路的时域分析方法	80
4.2.1	换路定律与初始值的确定	80
4.2.2	一阶电路的零输入响应	81
4.2.3	一阶电路的零状态响应	83
4.2.4	一阶电路的全响应	86
4.2.5	一阶电路的三要素法	87
4.3	二阶电路的时域分析方法	89
4.3.1	二阶电路的零输入响应	89
4.3.2	二阶电路的全响应	93
4.4	动态电路的时域 MATLAB 建模仿真	94
第 5 章	MATLAB 在正弦交流电路中的仿真应用	107
5.1	正弦交流电的基本概念	107
5.1.1	正弦量的三要素	107
5.1.2	相位差	108
5.1.3	正弦量的最大值与有效值	108
5.2	正弦量的相量表示法	109
5.3	正弦交流电路的分析方法	111
5.3.1	利用矩阵方程求解	111
5.3.2	相量模型的网孔电流分析法和节点电压分析法	112
5.3.3	运用戴维南定理及诺顿定理求解	114
5.4	正弦交流电路的 MATLAB 仿真分析	114

● 下篇 Multisim 电子技术及电力电子仿真应用 ●

第 6 章	Multisim 仿真基础	129
6.1	Multisim 概述	129

6.1.1	Multisim 简介	129
6.1.2	Multisim 的特点	130
6.2	Multisim 应用入门	131
6.2.1	Multisim 的元器件库及使用	131
6.2.2	Multisim 虚拟仪器仪表及使用	142
6.2.3	Multisim 的建模仿真步骤	150
6.3	Multisim 的仿真分析功能	153
6.3.1	直流工作点分析(DC Operating Point Analysis)	153
6.3.2	交流分析(AC Analysis)	154
6.3.3	瞬态分析(Transient Analysis)	156
6.3.4	失真分析(Distortion Analysis)	159
6.3.5	噪声分析(Noise Analysis)	160
6.3.6	直流扫描分析(DC Sweep)	162
6.3.7	参数扫描分析(Parameter Sweep Analysis)	164
6.3.8	灵敏度分析(Sensitivity Analysis)	166
6.4	Multisim 仿真分析实例——晶体管输出特性曲线测试	168
第 7 章	Multisim 在模拟电路中的仿真应用	171
7.1	二极管和晶体管输出特性虚拟仿真	171
7.1.1	二极管输出特性虚拟仿真	171
7.1.2	晶体管输出特性虚拟仿真	174
7.2	放大电路的仿真	176
7.2.1	单管放大电路	177
7.2.2	差动放大电路	181
7.2.3	功率放大器电路	190
7.3	集成运算放大器虚拟仿真	193
7.3.1	理想运放的基本特性	193
7.3.2	比例求和运算电路	194
7.3.3	积分与微分电路	196
7.3.4	有源滤波器	198
7.4	稳压电路虚拟仿真	204
7.4.1	稳压电路概述	204
7.4.2	硅稳压二极管稳压电路	205
7.4.3	串联型稳压电路	206
7.4.4	三端集成稳压器	209
第 8 章	Multisim 在数字电路中的仿真应用	210
8.1	逻辑门电路的虚拟仿真	210
8.1.1	与非门简介	210
8.1.2	仿真分析	211

8.2	组合逻辑电路的虚拟仿真	214
8.2.1	加法器	214
8.2.2	比较器	220
8.2.3	编码器	222
8.2.4	译码器	226
8.2.5	数据选择器	233
8.3	555 定时器的虚拟仿真	236
8.3.1	555 定时器电路原理	236
8.3.2	施密特触发器	237
8.3.3	单稳态触发器	240
8.4	A/D 与 D/A 转换电路的仿真	243
8.4.1	D/A 转换器	243
8.4.2	A/D 转换器	246
第 9 章	Multisim 在电力电子技术中的应用	252
9.1	单相整流电路的建模及仿真	252
9.1.1	基本理论概述	252
9.1.2	Multisim 仿真分析	256
9.2	三相整流电路的建模及仿真	265
9.2.1	基本理论概述	265
9.2.2	Multisim 仿真分析	269
9.3	直流斩波电路的建模及仿真	275
9.3.1	基本理论概述	275
9.3.2	Multisim 仿真分析	278
9.4	逆变电路的建模及仿真	282
9.4.1	基本理论概述	282
9.4.2	Multisim 仿真分析	286
第 10 章	Multisim 在电子技术课程设计中的应用	289
10.1	多位计数器的设计仿真	289
10.1.1	基本原理及设计要求	289
10.1.2	设计步骤	289
10.2	智力竞赛 8 路抢答器设计仿真	293
10.2.1	设计原理及设计要求	293
10.2.2	设计步骤	294
10.3	多功能数字钟设计仿真	297
10.3.1	设计原理及设计要求	297
10.3.2	设计步骤	298
参考文献		303

上

篇

MATLAB 电工技术仿真应用

MATLAB 仿真基础

电工技术领域涉及电路系统的模型建立、系统分析、系统设计的基本理论和相关技术,其特点是概念抽象、数学含量大、计算繁杂、曲线绘制复杂,学生难以理解和掌握。20 世纪 80 年代初期出现的以矩阵运算为特点的 MATLAB 语言,具有可视化编程能力的图形用户界面、Simulink 仿真功能和电气系统工具箱中丰富的库函数等,为电工技术领域的设计与仿真提供了强有力的工具,给系统的分析与设计带来了极大的方便,成为电路分析领域的一个很好的辅助工具,现今 MATLAB 已经成为国际、国内科学界最流行的辅助分析工具之一。

本章主要介绍有关 MATLAB 语言的一些基本知识,如 MATLAB 语言的特点、数值计算、基本的程序设计功能以及 Simulink 仿真集成环境等。

1.1 MATLAB 概述

1.1.1 初识 MATLAB

MATLAB 是“Matrix Laboratory”的缩写,意为“矩阵实验室”,是当今国际很流行的科学计算软件。在欧美大学里,诸如应用代数、数理统计、电工电子、自动控制、数字信号处理、模拟与数字通信、动态系统仿真等课程的教科书,都有 MATLAB 内容。MATLAB 是攻读学位的大学生、硕士生、博士生必须掌握的基本工具。在设计研究单位和工业部门,MATLAB 被认作是进行高效研究和开发的首选软件工具。在许多诸如控制论、时间序列分析、系统仿真、图像信号处理等方面产生的大量矩阵及其相应的计算问题,自己去编写大量的繁复的计算程序,不仅会消耗大量的时间和精力,减缓工作进程,而且往往质量不高。Mathwork 软件公司推出的 MATLAB 软件给人们提供了一个方便的数值计算平台。

MATLAB 是一个交互式的系统,它的基本运算单元是不需指定维数的矩阵,按照 IEEE 的数值计算标准(能正确处理无穷数 Inf(Infinity)、无定义数 NaN(Not-A-Number)及其运算)进行计算。系统提供了大量的矩阵及其他运算函数,可以方便地进行一些很复杂的计算,而且运算效率极高。MATLAB 命令和数学中的符号、公式非常接近,可读性强,容易掌握,还可利用它所提供的编程语言进行编程完成特定的工作。除基本部分外,MATLAB 还根据各专

门领域中的特殊需要提供了许多可选的工具箱,如应用于电工领域的电气系统(Power System)工具箱、自动控制领域的 Control System 工具箱和神经网络领域的 Neural Network 工具箱等。尤为重要的是,MATLAB 提供了可视化动态仿真环境——Simulink,可实现动态系统的直观建模、仿真与分析,并支持连续、离散及两者混合的线性与非线性系统,因此使一个复杂系统的输入和仿真变得相当简单。

现在,MATLAB 已经不仅仅是一个“矩阵实验室”了,它已经发展为适合多学科,功能强大的大型软件,成为高级课程的基本教学工具。如 MATLAB 可以实现以下功能:

- ① 微积分:微分,积分,求极限,泰勒展开,级数求和;
- ② 代数:求逆,特征值,行列式,代数方程解的简化,数学表达式的指定精度求值;
- ③ 数值分析:插值与拟合,数值微分与积分,函数逼近,代数方程和微分方程的数值解和符号解;
- ④ 统计计算:均值,方差,概率,参数估计,假设检验,相关性和回归分析,统计绘图,随机数产生器等;
- ⑤ 优化问题的求解:线性规划,非线性规划等问题的求解;
- ⑥ 动态系统模拟仿真等。

MATLAB 可以提供的工具箱如表 1-1 所示。

表 1-1 MATLAB 常见工具箱

Signal Process	信号处理	System Identification	系统辨识
Optimization	优化	Neural Network	神经网络
Control System	自动控制	Spline	样条
Symbolic Math	符号代数	Image Process	图像处理
Nonlinear Control	非线性控制	Statistics	统计

1.1.2 MATLAB 的特点

一种语言之所以能如此迅速地普及,显示出如此旺盛的生命力,是由于它有着不同于其他语言的特点,正如同 FORTRAN 和 C 等高级语言使人们摆脱了需要直接对计算机硬件资源进行操作一样,被称作第四代计算机语言的 MATLAB,利用其丰富的函数资源,使编程人员从繁琐的程序代码中解放出来。MATLAB 最突出的特点就是简洁。MATLAB 用更直观的、符合人们思维习惯的代码,代替了 C 和 FORTRAN 语言的冗长代码。MATLAB 给用户带来的是最直观、最简洁的程序开发环境。以下简单介绍 MATLAB 的主要特点。

1. 简洁灵活的语言风格

语言十分简单,使用灵活方便,书写形式自由,具有“草稿纸”功能。如果不是太多的任务,那么在命令窗口中可以按照自己的思路写入命令,并且可以即时看到结果。

2. 方便的数值运算

在 MATLAB 环境中,有超过 500 种数学、统计、科学及工程方面的函数可使用,函数的标识自然,使得问题和解答像数学式子一般简单明了,让使用者可全力发挥在解题方面,而

非浪费在计算机操作上。

3. 先进的资料视觉化功能

MATLAB 的物件导向图形架构让使用者可执行视觉数据,并制作高品质的图形,完成科学性或工程性图文并茂的文章。

4. 功能强大的工具箱

工具箱可分两类,即功能性工具箱和学科性工具箱。前者主要用来扩充其符号计算功能、图示建模仿真、文字处理及与硬件实时交互的功能。而学科性工具箱是专业性较强的,如优化、统计、控制、小波、图像处理和通信工具箱等。

5. 高阶但简单的程式环境

做为一种直译式的程式语言,MATLAB 允许使用者在短时间内写完程序,所花的时间约为用 FORTRAN 或 C 的几分之一,而且不需要编译(compile)及链接(link)即能执行,同时包含了更多及更容易使用的内建功能。

6. 开放及可延伸的架构

MATLAB 允许使用者接触它大多数的数学原使码,检视运算法,更改现存函数,甚至加入自己的函数,使 MATLAB 成为使用者所需要的环境。

7. 完善的帮助系统

MATLAB 有非常完善的帮助系统。总地来讲,有以下几个方面:

(1) 临场帮助

这些帮助内容,大多嵌附在 M 文件中,即时性强,反应速度快。它对求助内容的回答最及时准确,用 help 命令查询即可,方便可靠。

(2) 综合型在线帮助文档 helpdesk

该文库以 HTML 超文本形式独立存在。整个文库按 MATLAB 的功能和核心内容编排,系统性强,且可以借助“超链接”方便地进行交叉查阅。

(3) 演示软件 demo

这是一个内容广泛的演示程序。MATLAB 一向重视演示软件的设计,软件本身就带有完善的演示程序。

1.2 MATLAB 数值与运算

MATLAB 语言最早是专门为进行矩阵计算所设计的一门语言,数值数组(Numeric Array)和数组运算(Array Operations)始终是 MATLAB 的核心内容。自 MATLAB 5. x 版起,由于其“面向对象”的特征,这种数值数组(以下简称为数组)成为了 MATLAB 最重要的一种内建数据类型(Built-in Data Type),而数值运算就是定义在这种数据结构上的方法(Method)。MATLAB 语言作为一门主要用于计算的语言,与 C 或 FORTRAN 等高级语言有所不同。在本节中,主要介绍 MATLAB 语言数值运算的功能,这是 MATLAB 的最基本和最重要的部分。

1.2.1 变量与赋值

变量代表一个或若干个内存单元,为了对变量所对应的存储单元进行访问,需要给变量

命名。在 MATLAB 中,变量名是以字母开头,后接字母、数字或下划线的字符序列,最多 63 个字符。例如,mat112、mat_v1、mysim56_ 均为合法的变量名,而 56mysim、_mat 为非法的变量名。另外,在 MATLAB 中,变量名区分字母的大小写,如 mat、MAT 和 maT 表示三个不同的变量。

值得注意的是, MATLAB 提供的标准函数名以及命令名必须用小写字母。例如,求矩阵 A 的逆矩阵用 inv(A),不能写成 Inv(A)或 INV(A),否则会出错。

MATLAB 赋值语句有两种格式:

- (1) 变量=表达式;
- (2) 表达式。

其中表达式是用运算符将有关运算量连接起来的式子,其结果是一个矩阵。

在第一种语句形式下, MATLAB 将右边表达式的值赋给左边的变量,而在第二种语句形式下,将表达式的值赋给 MATLAB 的预定义变量 ans。

在 MATLAB 后面可以加上注释,用于解释或说明语句的含义,对语句结果不产生任何影响。注释以 % 开头,后面是注释的内容。

在赋值运算符右边使用变量,必须事先给变量赋值,因此,下面的表达式会产生错误:

```
>>x=2
x=
    2
>>t=x+a
??? Undefined function or variable 'a'.
```

下面的表达式则不会产生错误:

```
>>x=2
x=
    2
>>a=3.5
a=
    3.5000
>>t=x+a
t=
    5.5000
```

在很多时候,并不需要 MATLAB 输出结果,只需要在表达式后面加上分号(;)即可。在下面的命令中,开始输入 $x = 3$, MATLAB 及时地报告结果,第二次输入“ $x = 3;$ ”, MATLAB 就没有再花费空间输出结果,而是直接跳到命令提示符,等待下次输入。

```
>>x=3
x=
    3
>>x=3;
```

我们还可以在一行中包含多个表达式。例如,下面的表达式是合法的:

```
>>x=2; y=4; z=x*y
```

z=

8

注意那两个分号,它们告诉 MATLAB 不需要输出 x 和 y 的值。

当做许多计算时,结果可能会产生大量变量,可以通过在命令窗口中输入 `who` 来刷新内存,告诉 MATLAB 显示到目前为止所有变量名称。如果输入 `whos`,我们会得到更多信息,告诉我们当前内存中的变量、类型、每个变量所分配的内存空间以及它们是否是复数。要清除全部变量只需输入 `clear` 然后回车即可,要清除特定变量,则在 `clear` 后面带上变量名列表。

MATLAB 的数据显示格式(见表 1-2)由 `format` 命令来控制,它只影响结果在屏幕上的显示,不影响其计算与存储。MATLAB 总是以双精度执行所有的运算。

表 1-2 数据的显示格式

格 式		对 应 结 果	
命 令	含 义	4/3	1.2345e-6
<code>format short</code>	短格式	1.3333	0.0000
<code>format long</code>	长格式	1.333333333333333	0.00000123450000
<code>format short e</code>	短格式 e 方式	1.3333e+000	1.2345e-006
<code>format long e</code>	长格式 e 方式	1.333333333333333e+000	1.234500000000000e-006
<code>format short g</code>	短格式 g 方式	1.3333	1.2345e-006
<code>format long g</code>	长格式 g 方式	1.333333333333333	1.234500000000000e-006
<code>format hex</code>	16 进制格式	3ff5555555555555	3eb4b6231abfd271
<code>format +</code>	+ 格式	+	+
<code>format rat</code>	分数格式	4/3	1/810045
<code>format bank</code>	银行格式	1.33	0.00

1.2.2 MATLAB 常用数学函数

MATLAB 提供丰富的标准初等数学函数,包括 `abs`(绝对值)、`sqrt`(平方根)、`exp`(指数函数)和 `sin`(正弦函数)等。对负数取平方根或对数不会出错;MATLAB 将自动产生复数的结果。MATLAB 也提供很多高等数学函数,比如 `Bessel`(贝塞尔)函数和 `Gamma`(伽玛)函数。这些函数绝大部分支持复变量。要得到一个初等数学函数的列表,可以输入:

```
>>help elfun
```

要得到一个高等数学函数或者矩阵函数的列表,可以输入:

```
>>help specfun
```

```
>>help elmat
```

表 1-3~表 1-8 给出了常用的数学函数。

表 1-3 三角函数和双曲函数

名称	含 义	名称	含 义	名称	含 义
sin	正弦	csc	余割	atanh	反双曲正切
cos	余弦	asec	反正割	acoth	反双曲余切
tan	正切	acsc	反余割	sech	双曲正割
cot	余切	sinh	双曲正弦	csch	双曲余割
asin	反正弦	cosh	双曲余弦	asech	反双曲正割
acos	反余弦	tanh	双曲正切	acsch	反双曲余割
atan	反正切	coth	双曲余切	atan2	四象限反正切
acot	反余切	asinh	反双曲正弦		
sec	正割	acosh	反双曲余弦		

表 1-4 指数函数

名称	含 义	名称	含 义	名称	含 义
exp	E 为底的指数	log10	10 为底的对数	pow2	2 的幂
log	自然对数	log2	2 为底的对数	sqrt	平方根

表 1-5 复数函数

名称	含 义	名称	含 义	名称	含 义
abs	绝对值	conj	复数共轭	real	复数实部
angle	相角	imag	复数虚部		

表 1-6 圆整函数和求余函数

名称	含 义	名称	含 义
ceil	向 $+\infty$ 圆整	rem	求余数
fix	向 0 圆整	round	向靠近整数圆整
floor	向 $-\infty$ 圆整	sign	符号函数
mod	模除求余		

表 1-7 矩阵变换函数

名称	含 义	名称	含 义
fip1r	矩阵左右翻转	diag	产生或提取对角阵
fipud	矩阵上下翻转	tril	产生下三角
fipdim	矩阵特定维翻转	triu	产生上三角
Rot90	矩阵反时针 90° 翻转		