



普通高等教育规划教材

机电系统动态仿真

——基于MATLAB/Simulink

刘白雁 等编

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育规划教材

机电系统动态仿真

——基于 MATLAB/Simulink

刘白雁 陈新元 傅连东 编



机械工业出版社

本书重点介绍如何利用 MATLAB 进行机电系统动态仿真。系统介绍了 MATLAB 6.x 及 Simulink 软件包中与机电系统仿真有关的必要知识, 以及机电液系统建模、动态特性分析、控制系统设计、计算机仿真技术等相关理论、方法及 MATLAB 应用。书中的例子、习题涉及到控制原理、机构学、机械振动、液压传动、伺服系统等诸多机类专业课程, 希望能为读者应用 MATLAB 进行机电系统分析提供借鉴。

本书可作为理工院校机类专业本科生学习计算机仿真的教材或参考书, 也可供相关专业的研究生或科研人员使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

机电系统动态仿真: 基于 MATLAB/Simulink/刘白雁等编. —北京: 机械工业出版社, 2005.7

普通高等教育规划教材

ISBN 7-111-16775-9

I. 机... II. 刘... III. 机电系统 - 计算机仿真 - 计算机辅助计算 - 软件包, MATLAB - 高等学校 - 教材 IV. TH-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 066363 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: 王保家 版式设计: 霍永明 责任校对: 李秋荣

封面设计: 张静 责任印制: 杨曦

北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2005 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

1000mm × 1400mm B5·7 印张·267 千字

定价: 19.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68326294

封面无防伪标均为盗版

前 言

“仿真”一词译自英语单词“Simulation”，也译作模拟，是指对现实系统某一层次抽象属性的模仿。仿真方法早期被称为蒙特卡罗方法，即利用随机数实验求解随机问题的方法，其原理可追溯到1773年法国自然学家G.L.L. Buffon为估计圆周率值所进行的物理实验。在工程技术界，系统仿真是指通过对系统模型的试验间接地获取原形的规律性认识。

由仿真模型的种类，系统仿真可大致分为物理仿真和数学仿真两大类。物理仿真是根据现实系统的物理性质构造系统的物理模型，并在物理模型上进行试验；数学仿真则是根据现实系统的数学关系构造系统的数学模型，通过数学模型进行试验。由于数学仿真一般是在计算机上通过计算机软件来实现，因此数学仿真也就是通常所说的计算机仿真。伴随着计算机科学和技术的发展，计算机仿真应用的日益广泛，目前仿真技术在很大程度上通常就是指的计算机仿真。由于计算机仿真技术具有学科面广、综合性强、应用领域宽、无破坏性、可多次重复、安全、经济、不受气候条件和场地空间的限制等独特优点，因而在机械制造、航空航天、交通运输、石油钻采、经济管理、工程建设、军事模拟以及医疗卫生等诸多领域得到了广泛的应用。

计算机仿真技术的普及，在很大程度上是由于许多功能强大、使用方便的仿真软件的相继出现，这里值得一提的就是美国The Math Works公司推出的MATLAB仿真软件。MATLAB是一种面向科学与工程计算的高级语言，它以其强大的矩阵计算和图形可视化功能、极高的编程效率、丰富的专用工具箱、简单易学、使用方便等特点而为教学和科研工作者所青睐，目前已成为国际公认的最优秀的科技应用软件。对于正在高校学习的理工科大学生，借助MATLAB软件，可以轻而易举地将所学课程中那些抽象、枯燥的公式、定理，以及难以理

解、分析的对象模型、工程系统转变成形象直观的曲线、图形，从而大大地提高学习效率，加深对所学学科基础、专业知识的理解，这也是 MATLAB 一问世便在国外高校十分流行的一个重要原因。

本书作者长期从事机电系统控制、设计方面的教学与科研工作，深知高校机械类专业的学生在理解自动控制理论有关概念、机电系统建模、动静特性分析等方面存在不同程度的困难，而 MATLAB 软件正是帮助克服这些困难的得力工具之一。因此我们编写了这本面向高校机类专业大学生、研究生的基于 MATLAB 6.x 的机电系统动态仿真教材。本书主要内容分为两个方面，一是由浅入深地介绍 MATLAB 与机电系统仿真有关的必要知识，并为以后进一步深入学习 MATLAB 打下基础，其中对与 MATLAB 配套的 Simulink 软件包作了较为详细的介绍。对于一般的仿真应用，本教材提供的 MATLAB 内容基本上是够用的；二是结合 MATLAB 学习机械类有关专业的课程知识，这主要体现在教材中的例子和习题中，同时也设置了专门的章节较为深入地介绍一些机电液系统的 MATLAB 应用，希望能为读者应用 MATLAB 进行机电系统分析提供借鉴。

本教材曾经作为“仿真技术”课程的讲义在武汉科技大学机类各专业中连续使用了三届，根据教学中反映出的问题以及学生对教材的需求，我们重新编写了这本教材。由于作者的学科视野、学术修养有限，加之时间仓促以及篇幅的限制，这本教材在内容取舍、结构安排等方面仍有许多待完善之处；书中的疏漏、谬误之处也恐在所难免，恳请读者提出宝贵意见，我们将不胜感激！

编 者

目 录

前言

第 1 章 MATLAB 基础	1
1.1 概述	1
1.1.1 MATLAB 的发展历程	1
1.1.2 MATLAB 的基本组成和特点	2
1.2 MATLAB 操作界面	4
1.3 Command Window 运行	5
1.3.1 数值、变量和表达式	6
1.3.2 Command Window 操作	7
1.4 Command History 窗	9
1.5 Current Directory、路径设置器和文件管理	10
1.5.1 MATLAB 的搜索路径	10
1.5.2 Current Directory (当前目录浏览器)	11
1.6 Workspace Browser 和 Array Editor	12
1.6.1 Workspace Browser (工作空间浏览器)	12
1.6.2 Array Editor (数组编辑器)	13
1.7 M 文件编辑器和脚本编写	13
1.7.1 Editor/Debugger (M 文件编辑器) 简介	13
1.7.2 M 脚本文件编写初步	14
1.8 使用 MATLAB 帮助	15
习题 1	16
第 2 章 数组及其运算	18
2.1 简介	18
2.2 数值数组的生成和寻访	18
2.2.1 数值数组的生成	18
2.2.2 数值数组的寻访	21
2.3 数组运算和矩阵运算	23
2.3.1 执行数组运算的常用函数	23
2.3.2 数组和矩阵运算	24
2.4 非数和“空”数组	26

2.4.1 非数	26
2.4.2 “空”数组	27
2.5 数组的关系运算和逻辑运算	28
2.5.1 关系运算	28
2.5.2 逻辑运算	29
2.6 字符串数组	30
2.6.1 字符串数组创建与操作	30
2.6.2 串操作函数	31
2.6.3 串转换函数	32
2.7 元胞数组	34
2.7.1 元胞数组的创建和显示	34
2.7.2 元胞数组内容的调取	36
2.8 构架数组	36
习题 2	37
第 3 章 数据和函数的可视化	39
3.1 二维曲线绘图	39
3.1.1 plot 的基本调用格式	39
3.1.2 曲线的色彩、线型和数据点型	40
3.1.3 图形控制	42
3.2 三维绘图	51
3.2.1 plot3 的基本调用格式	51
3.2.2 三维网线图和曲面图	52
3.3 图形窗功能简介	61
习题 3	64
第 4 章 MATLAB 编程	66
4.1 MATLAB 程序控制	66
4.1.1 for 循环结构	66
4.1.2 while 循环结构	67
4.1.3 if-else-end 分支结构	68
4.1.4 switch-case 结构	68
4.1.5 try-catch 结构	70
4.1.6 控制程序流的其他常用指令	70
4.2 M 脚本文件和 M 函数文件	71
4.2.1 脚本文件	71
4.2.2 M 函数文件	71
4.2.3 M 函数文件的一般结构	71

4.2.4 局部变量和全局变量	73
4.3 变量的检测传递和限权使用函数	73
4.3.1 输入输出参量检测指令	73
4.3.2 子函数	74
4.3.3 私有函数	76
4.4 串演算函数	76
4.4.1 eval	76
4.4.2 feval	77
4.4.3 内联函数	78
4.5 函数句柄	78
4.5.1 函数句柄的创建和观察	79
4.5.2 函数句柄的基本用法	79
4.6 符号计算	80
4.6.1 符号对象和使用	81
4.6.2 符号表达式的操作	82
4.6.3 符号微积分	84
习题 4	85
第 5 章 系统模型	86
5.1 系统仿真概述	86
5.1.1 系统仿真及其分类	86
5.1.2 仿真模型与仿真研究	87
5.2 系统数学模型	88
5.2.1 系统时域模型	88
5.2.2 系统传递函数模型	88
5.2.3 系统零极点增益模型	89
5.2.4 状态空间模型	90
5.2.5 系统模型的转换	92
5.2.6 系统模型参数的获取	92
5.2.7 时间延迟系统建模	94
5.2.8 模型属性设置和获取	95
5.3 系统模型的连接	96
5.3.1 模型串联	96
5.3.2 模型并联	97
5.3.3 反馈连接	97
5.4 机电系统建模举例	99
5.4.1 半定系统建模	99
5.4.2 机械加速度计建模	101

5.4.3 磁悬浮系统建模	102
习题 5	104
第 6 章 系统时间响应及其仿真	106
6.1 仿真算法	106
6.1.1 数值积分的基本原理	106
6.1.2 数值积分方法的选择	111
6.1.3 基于离散相似法的系统仿真方法	112
6.2 系统仿真的 MATLAB 函数	113
6.2.1 数值积分方法的 MATLAB 函数	113
6.2.2 时间响应仿真的 MATLAB 函数	118
6.3 采样控制系统仿真	122
6.3.1 采样控制系统的基本组成	122
6.3.2 采样控制系统仿真特点	123
6.3.3 采样控制系统仿真方法	123
习题 6	126
第 7 章 系统频率响应及其仿真	128
7.1 频率特性的一般概念	128
7.1.1 频率响应与频率特性	128
7.1.2 Nyquist 图与 Bode 图	129
7.1.3 稳定裕度	129
7.2 连续系统频率特性的 MATLAB 函数	130
7.2.1 频率响应的计算	130
7.2.2 频率特性图示法	133
7.3 离散系统频域仿真	138
7.4 系统分析图形用户界面	141
习题 7	145
第 8 章 控制系统的综合与校正	147
8.1 系统性能指标的计算	147
8.1.1 时域指标	147
8.1.2 频域指标	151
8.2 系统校正的 MATLAB 编程	151
8.2.1 相位滞后校正	152
8.2.2 PID 校正	155
8.3 控制系统设计举例	159
8.3.1 汽车悬架系统控制	159

8.3.2 阀控液压马达速度控制系统	163
习题 8	165
第 9 章 Simulink 动态仿真	167
9.1 Simulink 基本操作	167
9.1.1 启动 Simulink	167
9.1.2 打开空白模型窗口	169
9.1.3 建立 Simulink 仿真模型	169
9.1.4 系统仿真运行	172
9.1.5 仿真结果的输出和保存	173
9.2 模块库和系统仿真	173
9.2.1 Simulink 模块库	173
9.2.2 Simulink 环境下的仿真运行	181
9.3 子系统创建与封装	186
9.3.1 子系统的创建	187
9.3.2 子系统的封装	190
9.3.3 条件子系统	195
9.4 Simulink 仿真举例	199
9.4.1 曲柄滑块机构的运动学仿真	199
9.4.2 悬吊式起重机动力学仿真	203
9.4.3 阀控液压缸的动刚度分析	205
习题 9	208
参考文献	211

第 1 章 MATLAB 基础

系统仿真是根据被研究的真实系统的数学模型研究系统性能的一门学科，现在尤指利用计算机去研究数学模型行为的方法，即数值仿真。数值仿真的基本内容包括系统、模型、算法、计算机程序设计及仿真结果显示、分析与验证等环节。

在系统仿真技术的诸多环节中，算法和计算机程序设计是很重要的一个环节，它直接决定原来问题是否能够正确求解，而 MATLAB 正是解决这一问题的首选软件。本章对 MATLAB 的基本结构及其基本操作做一简要介绍。

1.1 概述

1.1.1 MATLAB 的发展历程

MATLAB 名字由 MATrix 和 LABoratory 两词的前三个字母组合而成。1980 年前后，时任美国新墨西哥大学计算机科学系主任的 Cleve Moler 教授出于减轻学生编程负担的动机，为学生设计了一组调用 LINPACK（基于特征值计算的软件包）和 EISPACK（线性代数软件包）库程序的“通俗易懂”的接口，此即用 FORTRAN 编写的萌芽状态的 MATLAB。

早期的 MATLAB 只能作矩阵运算，并且只能用星号描点的形式画图，内部函数也只有几十个。但即使其当时的功能十分简单，作为免费软件在大学里使用，仍深受大学生的喜爱。

1984 年 Cleve Moler 和 John Little 成立了 The MathWorks 公司，正式把 MATLAB 推向市场。1990 年推出了首个可以运行于 Microsoft Windows 下的版本——MATLAB 3.5i；1993 年推出的 MATLAB 4.0 充分支持在 Microsoft Windows 下的界面编程；1997 年推出的 MATLAB 5.0 支持更多的数据结构；1999 年推出的 MATLAB 5.3 进一步改善了 MATLAB 语言的功能，其全新版本的最优化工具箱和 Simulink 3.0 都达到了很高档次；2000 年 10 月推出的 MATLAB 6.0 在操作界面上有了很大改观，其数值计算的速度更快、性能更好，与 C 语言接口及转换的兼容性更强，与之配套的 Simulink 4.0 增加了更多的功能；2001 年 6 月推出了 MATLAB 6.1 及 Simulink 4.1 功能已经十分强大，其新的虚拟现实工具箱给仿真结果的三维视景显示提供了新的解决方案；2002 年 8 月问世的 MATLAB 6.5 及 Simulink 5.0 在已

有版本上作了进一步的改进，如增加了变量名、函数名、文件名的最大长度，改进了开发环境和外部接口等。目前 MATLAB 已经发展到了 7.0 版，但对于一般的仿真使用，MATLAB6.x 的任何一种版本都是适用的。因此本教材主要介绍基于 MATLAB 6.x 的系统仿真，其内容基本适用于各种 MATLAB 6.x，并在需要之处介绍不同版本间的差异。

现在的 MATLAB 已经不仅仅是一个“矩阵实验室”了，它以强大的科学计算与可视化功能、简单易用、开放式可扩展环境、强大的 30 多种面向不同领域的工具箱支持，在科学研究和产品开发中有着广阔的前景和巨大的潜能，如：

- 数据分析；
- 数值和符号计算；
- 工程与科学绘图；
- 控制系统设计；
- 数字图像信号处理；
- 财务工程；
- 建模、仿真、原形开发；
- 应用开发；
- 图形用户界面设计。

1.1.2 MATLAB 的基本组成和特点

MATLAB 集计算、可视化及编程于一身。在 MATLAB 中，无论是问题的提出还是结果的表达都采用人们习惯的数学描述方法，而不需用传统的编程语言进行前后处理。这一特点使 MATLAB 成为了数学分析、算法开发及应用程序开发的良好环境。

1. MATLAB 的主要产品构成

MATLAB 产品由一系列的产品模块构成，简述如下：

- MATLAB

所有 The MathWorks 公司产品的数值分析和图形处理的基础环境。

- MATLAB Toolbox

这是一系列针对不同领域应用的各种专用的 MATLAB 函数库。工具箱是开放、可扩展的，用户可以查看其中的算法，或开发自己的算法。

- MATLAB Compiler

该编译器可将用 MATLAB 语言编写的 M 文件自动转换成 C 或 C++ 文件。结合 The MathWorks 公司提供的 C/C++ 数学库和图形库，用户可以利用 MATLAB 快速地开发出功能强大的独立应用。

- Simulink

这是一种结合了框图界面和交互仿真能力的极其简便的动态系统仿真工具。

- Stateflow

与 Simulink 框图模型相结合, 描述复杂事件驱动系统的逻辑行为, 驱动系统在不同的模式之间进行切换。

- Real-Time Workshop

直接从 Simulink 框图自动生成 C 或 ADA 代码, 用于快速原型和硬件的回路仿真。

2. MATLAB 语言的特点

MATLAB 语言被称为第四代计算机语言。正如第三代计算机语言(如 FORTRAN、C 等)使人们摆脱了计算机硬件的束缚一样, MATLAB 语言可帮助软件开发者从繁琐的程序代码中解放出来。MATLAB 的丰富的函数使开发者无需重复编程, 只需简单的调用即可。MATLAB 语言有以下几个主要特点。

- 编程效率高

用 MATLAB 编写程序犹如在演算纸上排列公式, 因此也通俗地称 MATLAB 语言为演算纸式科学算法语言。由于它编写简单, 因而编程效率高, 易学易用。

- 使用方便

MATLAB 语言是一种解释执行的语言, 无须编译、连接, 而是将编辑、编译、连接和执行融为一体; 它能在同一界面上进行灵活操作, 快速排除程序中的各类错误, 从而加快了用户编写、修改和调试程序的速度。

- 高效方便的科学计算

MATLAB 拥有 500 多种数学、统计及工程函数, 可使用户立刻实现所需的强大的数学计算功能。由各领域的专家学者们开发的数值计算程序, 使用了安全、成熟、可靠的算法, 从而保证了最大的运算速度和可靠的结果。

- 先进的可视化工具

MATLAB 提供功能强大的、交互式的二维和三维绘图功能。可使用户创建富有表现力的彩色图形。可视化工具包括: 曲面渲染、线框图, 伪彩图、光源, 三维等位线图、图像显示、动画、体积可视化等。

- 开放性、可扩展性强

MATLAB 所有核心文件和工具箱文件都是公开的、可读可写的源文件, 是可见的 MATLAB 程序, 所以用户可以查看源代码、检查算法的正确性, 修改已存在的函数, 或者加入自己的新部件, 包括:

- 运行时动态连接外部 C 或 FORTRAN 应用函数
- 在独立 C 或 FORTRAN 程序中调用 MATLAB 函数
- 输入输出各种 MATLAB 及其他标准格式的数据文件
- 创建图文并茂的技术文档, 包括 MATLAB 图形、命令, 并可通过 MS-

Word 输出

- 特殊应用工具箱

MATLAB 的工具箱加强了对工程及科学中特殊应用的支持。工具箱也和 MATLAB 一样是完全用户化的，可扩展性强。将某个或某几个工具箱与 MATLAB 联合使用，可以得到一个功能强大的计算组合包，满足用户的特殊要求。

● 高效仿真工具 Simulink

Simulink 是用来建模、分析和仿真各种动态系统的交互环境，包括连续系统、离散系统和混杂系统。Simulink 提供了采用鼠标拖放的方法建立系统框图模型的图形交互界面。通过 Simulink 提供的丰富的功能块，用户可以迅速地创建系统的模型，不需要书写一行代码。

1.2 MATLAB 操作界面

要进入 MATLAB 工作环境，只需点击 MATLAB 图标即可。MATLAB 6.1 版本以后的各种版本的操作界面大致相同，图 1-1 和图 1-2 分别为 MATLAB 6.1、6.5 版本的界面，其操作界面上的通用窗口简介如下。

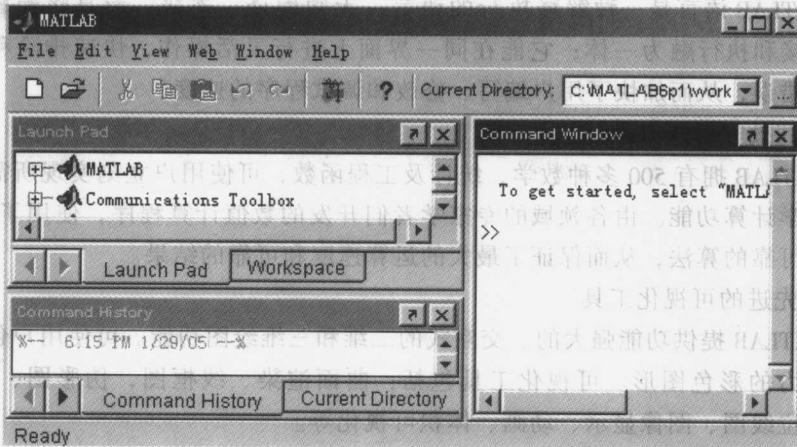


图 1-1 MATLAB 6.1 版本的默认操作界面

- 工作空间浏览器 (Workspace Browser)

罗列 MATLAB 工作空间所有变量名、类型、字节数等。

- 历史指令窗 (Command History)

该窗记录已经运作过的指令、函数、表达式。

- 指令窗 (Command Window)

该窗是进行各种 MATLAB 操作的最主要窗口。在该窗内可键入各种送给

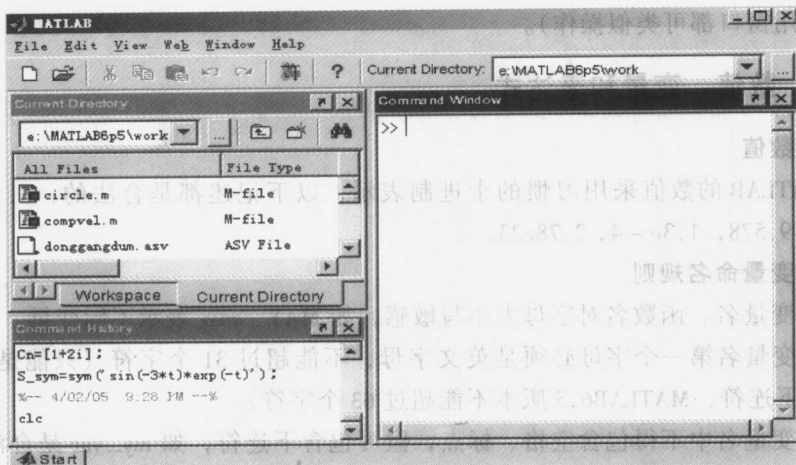


图 1-2 MATLAB 6.5 版本的默认操作界面

MATLAB 运作的指令、函数、表达式，并显示除图形外的所有运算结果。

- 交互界面分类目录窗 (Launch Pad)


以树状结构罗列 MATLAB 提供的所有交互界面。

- 当前目录浏览器 (Current Directory Browser)

可进行当前目录设置，展示、复制、编辑和运行相应目录下的 M 文件。

在 MATLAB 6.5 版本的界面上没有交互界面分类目录窗 (Launch Pad)，但点击该界面左下角的 **Start**，在弹出的菜单上也可找到相应的内容。

1.3 Command Window 运行

MATLAB 指令窗默认位于 MATLAB 桌面的右方，点击该指令窗右上角的  键，就可获得图 1-3 所示的独立指令窗。若要让独立指令窗缩回桌面，则只要选中指令窗的【View: Dock Command Window】下拉菜单项即可 (MATLAB 桌面上的

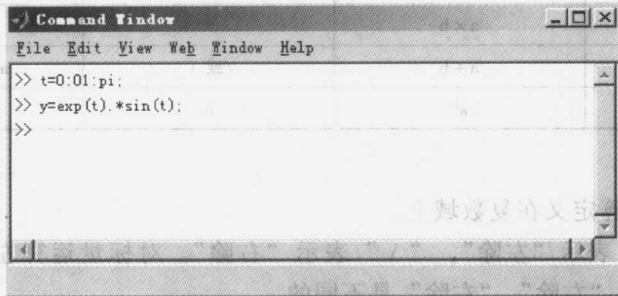


图 1-3 独立指令窗

其他通用窗口都可类似操作)。

1.3.1 数值、变量和表达式

1. 数值

MATLAB 的数值采用习惯的十进制表示，以下记述都是合法的：3，-99，0.001，9.578， $1.3e-4$ ， $2.78e23$ 。

2. 变量命名规则

- 变量名、函数名对字母大小写敏感，如 MAY、may 表示不同变量。
- 变量名第一个字母必须是英文字母，不能超过 31 个字符（只能是英文、数字和下连符，MATLAB6.5 版本不能超过 63 个字符）。
- 变量名中不得包含空格、标点，但可包含下连符，如 my_var 是合法的变量名。

3. MATLAB 默认的预定义变量

ans 计算结果的默认变量名

i 或 j 虚单元 $i = j = \sqrt{-1}$

pi 圆周率 π

Inf 或 inf 无穷大，如 $1/0$

NaN 或 nan 不是一个数 (Not a Number)，如 $0/0$ ， ∞/∞

realmax 最大正实数

realmin 最小正实数

4. 运算符和表达式

MATLAB 的基本运算符如表 1-1 所示。

表 1-1 运算符和表达式

	数学表达式	运算符	MATLAB 表达式
加	$a + b$	+	$a + b$
减	$a - b$	-	$a - b$
乘	$a \times b$	*	$a * b$
除	$a \div b$	/或 \	a/b 或 $b \setminus a$
幂	a^b	^	$a \wedge b$

[说明]

- 所有运算定义在复数域上。
- 用 “/” 表示 “左除”，“\” 表示 “右除”。对标量运算左、右除相同；但对矩阵来说，“左除”、“右除”是不同的。
- 表达式由变量名、运算符和函数名组成。

- 书写表达式时赋值符“=”和运算符两侧允许有空格。
- 运算的优先级依次是：指数运算、乘除运算、加减运算。

5. 复数和复数矩阵

MATLAB 直接以复数矩阵为数值运算对象，则标量为矩阵的子集，实数为复数的子集。如可直接在指令窗中输入 $-5 + 3i$ 或 $-5 + 3j$ ($3i$ 或 $3j$ 之间不能有空格)，以及复数形式的矩阵，同时 MATLAB 还提供了有关复数操作的专门指令：

real (z) 给出复数 z 的实部
 imag (z) 给出复数 z 的虚部
 abs (z) 给出复数 z 的模
 angle (z) 给出复数 z 的相角 (单位为弧度)

[说明]

- 在指令窗中输入以下的复数 c 的表达式是合法的：

c = 3 + 5i

c = 3 + 5 * i

它们为相同的复数。但如果复数的虚部用变量名表示，则该变量名和虚单元之间必须要用“*”隔开。以下的复数 c 的表示是正确的：

a = 3

b = 5

c = a + b * i

以上所输入的各种形式的复数 c，MATLAB 在指令窗中均显示为如下形式：

c =

3.0000 + 5.0000i

1.3.2 Command Window 操作

1. MATLAB 中的标点符号

标点符号在 MATLAB 语言中有重要作用，应当熟悉各种标点符号的用法，一些常用的标点符号的功能如表 1-2 所示。

表 1-2 MATLAB 常用标点符号的功能

名称	标点	功 能
空格		输入量之间、数组元素之间分隔符
逗号	,	具有空格的功能，还可作为要显示运算结果的指令间的分隔符
黑点	.	数值中表示小数点
分号	;	不显示计算结果指令的“结尾”标志；不显示计算结果的指令间的分隔符；数组行间分隔符
注释号	%	注释行的“启首”标志