



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材



自动控制原理

——实验与实践篇

(第二版)

杨 平 余 洁 徐春梅 徐晓丽 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

自动控制原理

——实验与实践篇

(第二版)

编著 杨 平 余 洁
徐春梅 徐晓丽
主审 应启夏



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材。

全书共分基础篇、实验篇和实践篇三篇。基础篇主要介绍了 MATLAB 软件应用基础和计算机仿真基础知识；实验篇为自动控制原理实验课教材，与自动控制原理理论课的内容相对应；实践篇专为自动控制原理专题实践（课程设计）而编写。本书紧扣自动控制理论核心方法，活用先进的实验技术和强化实用的实践技能。

本书可作为高等学校自动化及相关专业“自动控制原理”课程的实验与实践教材，也可供自学自控原理的科技人员及工程技术人员学习和参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

自动控制原理：实验与实践篇/杨平等编著. —2 版. —北京：中国电力出版社，2015.8

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

ISBN 978-7-5123-8182-7

I. ①自… II. ①杨… III. ①自动控制理论—高等学校—教材
IV. ①TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 189939 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2011 年 10 月第一版

2015 年 8 月第二版 2015 年 8 月北京第三次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 13.5 印张 324 千字

定价 27.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前言

学习自动控制原理课程有多种方式：自学、课堂听讲、做实验、专题实践等。其中实践性学习方式越来越受到重视。实践性教学已成为自动控制原理课程教学的必不可少的组成部分。在许多高校已开始把自动控制原理课程实验从自动控制原理课程中分离出来成为像物理实验一样的独立课程。还配套有一周的集中实践环节：自动控制原理专题实践。这样，自动控制原理的教学模式变成：理论教学+实验教学+集中实践。这种新模式，分工明确、前后连贯、易于实施、学习高效。可以说是从应试教育转向素质教育的改革措施，是提高本科教学质量的新尝试。为此，需要提供一本配套的新教材，涵盖自动控制原理实验课程和自动控制原理专题实践环节。本书就是为这一需求编写的。

自动控制原理课程教学中开设实验已有多年的历史。远的不论，从 20 世纪 80 年代起至今的三十余年间已发生了许多变化。就实验设备而言，在 20 世纪 80 年代是电子模拟装置+双笔记录仪或示波器；在 20 世纪 90 年代是电子模拟装置+PC 机；到 21 世纪后开始直接用装有 MATLAB 软件的 PC 机做计算机仿真及更多的实验。就实验内容而言，在 20 世纪 80 年代受电子模拟装置的限制，只能做典型环节动态特性实验等少数几项实验；PC 机的使用不但使原先的实验结果可以随意记录和绘图显示，还使实验项目增添了根轨迹图和频率特性图分析等项目；MATLAB 软件的使用更是把自动控制原理实验内容变得丰富多彩，几乎所有的控制原理分析技术都可用实验的方式显现。本书所依据的主要的实验设备就是装有 MATLAB 软件的 PC 机。

有的老师觉得用计算机仿真的方式做实验，一点也不真实。物理实验装置才是看得见、摸得着的。因此，主张非用电子模拟装置不可。换一个角度考虑，做自动控制原理实验的目的主要是让学生更快更好地掌握和理解自动控制的基本原理和分析技术，无论采用何种方式做实验，只要能达到这个目的就是可行的。何况，自动控制原理的分析技术主要依据的是线性模型及数学分析，不管是什么物理化学过程都可抽象成线性模型来分析，而 MATLAB 就是最好的线性系统计算机辅助分析工具。所以，采用装有 MATLAB 软件的 PC 机实验平台也未尝不可。正是由于采用了装有 MATLAB 软件的 PC 机实验平台，那么在用它进行自动控制原理实验以前应该具备一定的 MATLAB 软件应用基础以及计算机仿真的基本概念。为此，本书的第 1 篇，简要介绍了这方面的基础知识和操作技能。

本书第 2 篇所编排的自动控制原理实验，在内容上与杨平等编写的“自动控制原理——理论篇”一书的第二~九章相呼应。可以安排实验课与理论课在同一学期进行，但实验课的开始时间比理论课晚半个学期。这样，在理论上先建立了初步的概念，在实验中又可进一步明确和加深，从而收到事半功倍的效果。

在自动控制原理的理论课教学和实验课教学完成后，趁热打铁地安排一次集中实践教学非常有必要。因为实践教学与实验教学不同，它重在对实际过程的应用。实际过程是生动的和具体的。实际过程的控制要求是灵活多变的。实际控制系统的设计和实施的特别

能锻炼学生的动手能力和综合素质并激发专业学习兴趣和热情。本书的第3篇为实践篇。编入了许多应用实例。学生设计的控制系统,有的可在装有MATLAB软件的PC机上进行设计验证;有的可用已建的专用设备,如倒立摆装置、教学机器人或实时温度控制装置现场实施。可将学生分成若干小组,分专题去实践。

本书的前身是中国电力出版社2005年版的“自动控制原理实验与实践”(杨平、余洁、冯照坤、翁思义编著)。这本2005年版的教材已用了六年,曾四次重印。无论是编者和读者都觉得该书正是自动控制原理实验与实践教学所需要的,主体不错,具体还是有许多瑕疵和固有缺陷。因此,这次教材新编,采纳了许多教师和学生的意见,内容和写法都有较大改动。新编教材仍由基础篇、实验篇和实践篇组成。其中,第1篇的第1和第2章及第3篇的第6和第7章由徐春梅改写或新写;第2篇的第1~8章由余洁改写或新写;第1篇的第3章、第3篇的第1章和第8章由杨平新写或改写;第3篇的第2~5章由徐晓丽和杨平改写或新写。全书的统稿和定稿工作由杨平完成。

本书的审稿工作仍请上海理工大学的应启夏教授完成,应教授的诚挚又中肯的修改意见被采纳后又使本书增色不少。在此,致以真诚的谢意。

限于编者的认知和经验,书中难免有不足之处。为重印和改版时能及时纠正,恳请发现任何谬误的读者发电邮至 yangping0978@126.com,直接给予批评指正。

编 者

2015年7月

目 录

前言

第1篇 基础篇

第1章 MATLAB 基础	1
1.1.1 MATLAB 概述	1
1.1.2 MATLAB 界面	2
1.1.3 数值运算	4
1.1.4 符号运算	10
1.1.5 图形处理	13
1.1.6 M 文件编程	18
1.1.7 课内练习	23
1.1.8 课外实验	23
第2章 Simulink 基础	24
1.2.1 Simulink 基本操作	24
1.2.2 输入信号模块设置	31
1.2.3 仿真过程设置	32
1.2.4 输出模块设置	36
1.2.5 课内练习	39
1.2.6 课外实验	39
第3章 计算机仿真基础	40
1.3.1 计算机仿真概述	40
1.3.2 计算机仿真的基本原理	41
1.3.3 计算机仿真试验	49
1.3.4 课内练习	50
1.3.5 课外实验	51

第2篇 实验篇

第1章 控制系统的数学模型	52
2.1.1 系统数学模型的建立	52
2.1.2 系统数学模型间的转换	56
2.1.3 系统模型的连接	63

2.1.4	阶跃响应实验建模	64
2.1.5	课内练习	67
2.1.6	课外实验	68
第2章	控制系统的时域分析	69
2.2.1	控制系统的时域分析概述	69
2.2.2	控制系统时域响应的仿真及分析	71
2.2.3	控制系统的稳定性分析	81
2.2.4	控制系统稳态误差计算	84
2.2.5	课内练习	85
2.2.6	课外实验	86
第3章	控制系统的时域设计	87
2.3.1	控制系统的设计理论概要	87
2.3.2	PID 控制系统	87
2.3.3	串级控制系统	95
2.3.4	前馈控制系统	97
2.3.5	迟延补偿控制系统	98
2.3.6	课内练习	100
2.3.7	课外实验	100
第4章	控制系统的根轨迹分析与设计	102
2.4.1	根轨迹的绘制与分析	102
2.4.2	控制器的根轨迹法设计	107
2.4.3	控制器设计工具——rltool 设计环境	112
2.4.4	课内练习	116
2.4.5	课外实验	116
第5章	控制系统的频域分析与设计	117
2.5.1	系统频率响应计算	117
2.5.2	Nyquist 图的绘制及分析	118
2.5.3	Bode 图的绘制及分析	120
2.5.4	Nichols 图的绘制	124
2.5.5	控制器的频域法设计	125
2.5.6	课内练习	132
2.5.7	课外实验	133
第6章	离散控制系统分析与设计	134
2.6.1	离散控制系统的建模	134
2.6.2	离散控制系统的分析	137
2.6.3	离散控制系统的 Simulink 模型与仿真	140
2.6.4	离散控制系统的设计	143
2.6.5	课内练习	145
2.6.6	课外实验	146

第7章 状态变量控制系统分析与设计	147
2.7.1 状态空间模型的分析	147
2.7.2 能控性和能观性的判别	149
2.7.3 状态反馈控制器的设计	152
2.7.4 状态观测器的设计	153
2.7.5 线性二次型最优控制器设计	154
2.7.6 课内练习	155
2.7.7 课外实验	156
第8章 非线性控制系统分析	157
2.8.1 非线性系统的 Simulink 的建模仿真	157
2.8.2 非线性系统的描述函数法应用	159
2.8.3 基于 Simulink 的相平面图绘制	160
2.8.4 课内练习	162
2.8.5 课外实验	163

第3篇 实 践 篇

第1章 控制原理应用实践导论	164
3.1.1 控制原理应用实践的技术路线	164
3.1.2 控制技术应用概要	165
3.1.3 控制原理应用实践报告写作要点	167
第2章 飞行控制	169
3.2.1 飞机俯仰角度控制	169
3.2.2 飞机机动襟翼角的计算机控制	169
3.2.3 航天飞机的俯仰控制	170
第3章 车行控制	171
3.3.1 电传动内燃机车的速度控制	171
3.3.2 主动式悬挂减震控制	171
3.3.3 磁悬浮列车的空气隙控制	172
第4章 船行控制	173
3.4.1 水翼船渡轮的纵倾角控制	173
3.4.2 船舶航向的自动操舵控制	173
第5章 工业过程控制	175
3.5.1 电缆卷线机线速控制	175
3.5.2 单容水箱水位控制	175
3.5.3 铣床切削深度控制	176
3.5.4 电网频率的一次调节	177
3.5.5 核电站压水堆一回路水温控制	177

3.5.6	双容水箱水温控制	178
第6章	电阻炉温度控制装置	179
3.6.1	电阻炉温度控制装置简介	179
3.6.2	电阻炉温度控制过程仿真实验	180
3.6.3	电阻炉温度控制过程实时监控	181
3.6.4	实践课题	184
第7章	倒立摆控制装置	185
3.7.1	直线型倒立摆实验装置	185
3.7.2	直线一级倒立摆机理建模	186
3.7.3	直线一级倒立摆的 PID 控制	189
3.7.4	直线一级倒立摆的状态反馈控制	192
3.7.5	实践课题	194
第8章	教学机器人	195
3.8.1	教学机器人简介	195
3.8.2	教学机器人的直线行走	195
3.8.3	教学机器人的直线行走控制	196
3.8.4	实践课题	197
附录1	Simulink 模块库图标和名称一览表	198
附录2	控制原理实验报告写作指导	203
参考文献		205

第1篇 基础篇

第1章 MATLAB 基础

1.1.1 MATLAB 概述

MATLAB (Matrix Laboratory, 矩阵实验室) 是一款功能十分强大的工程计算及数值分析软件, 主要应用于工程计算、控制设计、信号处理与通信、图像处理、信号检测等领域。

MATLAB 早期主要用于现代控制中复杂的矩阵、向量的各种运算。由于 MATLAB 提供了强大的矩阵处理和绘图功能, 因此很多专家在自己擅长的领域用它编写了许多专门的 MATLAB 工具包 (toolbox), 如控制系统工具包 (control systems toolbox)、系统辨识工具包 (system identification toolbox)、信号处理工具包 (signal processing toolbox)、鲁棒控制工具包 (robust control toolbox)、最优化工具包 (optimization toolbox) 等。因此, MATLAB 成为一种包罗众多学科的功能强大的“技术计算语言 (The Language of Technical Computing)”, 也可说它是“第四代”计算机语言。在欧美等高等院校中, MATLAB 软件已成为应用代数、自动控制原理、数理统计、数字信号处理、时间序列分析、动态系统仿真等课程的基本数学工具, 成为学生所必须掌握的基本软件之一。

MATLAB 以矩阵作为基本编程单元, 它提供了各种矩阵的运算与操作, 并有较强的绘图功能。MATLAB 集科学计算、图像处理、声音处理于一身, 是一个高度的集成系统, 有友好的用户界面和完善的帮助功能。

MathWorks 公司于 1992 年推出了具有划时代意义的 MATLAB 4.0 版本, 并推出了交互式模型输入与仿真系统 Simulink, 它使得控制系统的仿真与 CAD 应用更加方便、快捷, 用户可以方便地在计算机上建模和仿真实验。1997 年 MathWorks 推出的 MATLAB 5.0 版允许了更多的数据结构。2003 年推出的 MATLAB 6.5.1, 图形功能和用户图形界面的编程能力都得到了很大程度的提高。2010 年 9 月推出 MATLAB 7.11, 进一步强化了数值计算和 Simulink 的功能。

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, 被称作为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, 它主要有如下特点。

(1) 语言简洁, 编程效率高, 使用方便灵活。MATLAB 程序书写形式自由, 允许用数学形式的语言编写程序, 且比 C 语言等更加接近书写计算公式的思维方式。

(2) 运算符和库函数丰富。MATLAB 除了提供了和 C 语言几乎一样多的运算符外, 还提供了广泛的矩阵和向量运算符。利用其运算符和库函数可使其程序相当简短, 两三行语言就可实现几十甚至几百行 C 或 FORTRAN 的程序功能。

(3) MATLAB 既具有结构化的控制语句 (如 for 循环、while 循环、break 语句、if 语句和 switch 语句), 又有面向对象编程的特性。

(4) 扩充能力强, 交互性好。MATLAB 语言有丰富的库函数, 而且用户文件也可作库函数使用。用户可以根据自己的需要建立和扩充新的库函数。

(5) 程序的可移植性很好, 可以在各种型号的计算机和操作系统上运行。

(6) MATLAB 的图形功能强大。它既包括对二维和三维数据可视化、图像处理、动画制作等高层次的绘图命令, 也包括可以修改图形及编制完整图形界面的低层次绘图命令。

(7) 功能强大的工具箱可分为两类: 功能性工具箱和学科性工具箱。功能性工具箱主要用来扩充其符号计算功能, 图示建模仿真功能, 文字处理功能以及和硬件实时交互功能。而学科性工具箱是专业性比较强的, 如控制工具箱、图像处理工具箱、通信工具箱等。

(8) 源程序的开放性。除内部函数以外, 所有 MATLAB 的核心文件和工具箱文件都是可读可改的源文件, 用户可通过对源文件的修改以及加入自己的文件构成新的工具箱。

1.1.2 MATLAB 界 面

一、MATLAB 的运行界面

1. MATLAB 的启动方法

当 MATLAB 安装完成后, 在桌面上创建一个 MATLAB 的快捷图标。双击该图标就可以打开 MATLAB 的工作界面; 也可以通过打开开始菜单的程序选项选择 MATLAB 的程序选项来打开; 还可以在 MATLAB 的安装路径中找到可执行文件 Matlab.exe 来启动 MATLAB。MATLAB 启动后将呈现如图 1-1-1 所示的工作界面。

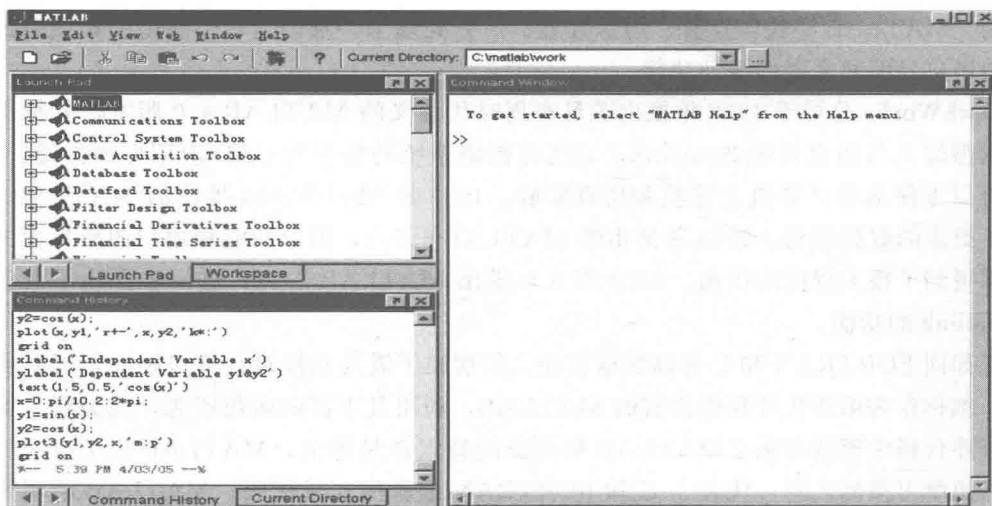


图 1-1-1 MATLAB 的工作界面

2. MATLAB 操作界面

图 1-1-1 所示的是默认设置情况下的 MATLAB 操作界面。它包含 5 个窗口。具体为命令窗口 (Command Window)、工作空间窗口 (Workspace)、当前路径窗口 (Current Directory)、命令历史窗口 (Command History)、启动平台 (Launch Pad)。其中, 工作区间

窗口和启动平台共用一个窗口；当前路径窗口和命令历史窗口公用一个窗口。

(1) 命令窗口 (Command Window)：用于输入 MATLAB 命令、函数、矩阵、表达式等信息，并显示除图形以外的所有计算结果，是 MATLAB 的主要交互窗口。当命令窗口出现提示符 `>>` 时，表示 MATLAB 已准备好，可以输入命令、变量或运行函数。

(2) 工作空间窗口 (Workspace)：是 MATLAB 用于存储各种变量和结果的内存空间。通过工作空间窗口可以观察变量的变量名、数据结构、字节数及数据类型等信息。

(3) 当前路径窗口 (Current Directory)：用于显示及设置当前工作路径，同时显示当前工作路径下的文件名、文件类型及路径的修改时间等信息。

(4) 命令历史窗口 (Command History)：为记录已运行过的 MATLAB 命令而设计的，该窗口自动记录已运行过的命令、函数、表达式等信息；并表明使用时间，以方便使用者查询。当双击某一行历史命令，即在命令窗口中复制并执行该命令。或者通过方向键中的上下键来查找历史命令，同时相应的命令显示在命令窗口里。

(5) 启动平台 (Launch Pad)：可以帮助用户方便地打开和调用 MATLAB 的各种程序、函数和帮助文件。

二、MATLAB 帮助系统

MATLAB 提供了数目繁多的函数和命令，要全部把它们记下来是不现实的。可行的办法是先掌握一些基本内容，然后在实践中不断总结、积累和掌握其他内容。更重要的学习方法是通过软件系统本身提供的帮助系统来学习软件的使用。MATLAB 提供了相当丰富的帮助信息，同时也提供了获得帮助的方法。首先可以通过操作界面平台的 help 菜单获得帮助，也可以通过工具栏的帮助选项获得帮助，此外，还可以在命令窗口中输入帮助命令。通常能够起到帮助作用、获取帮助信息的指令有 help、lookfor、helpbrower、helpwin、which、doc、get、type 等。

(1) help 指令。

help 指令是 MATLAB 中最有用的指令之一。help 命令的用法主要有以下几种：

help	弹出在线帮助总览窗
help 函数名	查询具体函数的详细信息,通常会有少量的示例
help elfun	寻求关于基本函数的帮助
helpwin	打开 MATLAB 的帮助主窗口
helpdesk	打开 MATLAB 的帮助工作台
help help	打开有关如何使用帮助信息的帮助窗口

(2) Lookfor 命令。

Lookfor 命令可根据用户提供的完整或不完整的关键词，搜索出一组与之相关的命令和函数。通常，在用户不确定需要搜索的函数，但知道函数功能的时候，可以通过 lookfor 搜索该功能的关键词。

【示例 1-1-1】 查找关于图像的命令和函数，将 image 作为关键词来查找。

键入 lookfor image，可知与 image 相关的有 6 个函数名，分别如图 1-1-2 所示。

(3) 模糊查找。

MATLAB 6.0 以后的版本提供了一种方便的查询方法，即模糊查询。用户只要输入命令的前几个字母，然后按 Tab 键，MATLAB 就会列出所有以这几个字母开始的命令。

```
>>lookfor image
CONTRAST  Gray scale color map to enhance image contrast.
FRAME2IM  Convert movie frame to indexed image.
IM2FRAME  Convert indexed image into movie format.
IMAGE      Display image.
IMAGESC    Scale data and display as image.
```

图 1-1-2 [示例 1-1-1] 的运行结果

【示例 1-1-2】 查询以 plot 开头的命令。

键入 plot 然后按 Tab 键即可，用户可通过“HELP”命令查询所需命令的详细信息，运行结果如图 1-1-3 所示。

```
>>plot
plot      plotchar    plotfis    plotnic    plotsom
plot3     ploteach    plotfrsp   plotnyq    plotstep
plot3m    plottedit   plotlr     plotpc     plottr
plotall   plotep      plotm      plotperf   plotv
plotbintree ploterr     plotmap    plotpv     plotvec
plotbode  plotes     plotmatrix plotscale  plotyy
plotbr    plotfa     plotmf     plotsm
```

图 1-1-3 [示例 1-1-2] 的运行结果

1.1.3 数 值 运 算

一、变量

1. 变量命名的规则

MATLAB 中变量命名的规则如下：

- (1) 第一个字母必须是英文字母，之后的可以是任意字母、数字或下划线；
- (2) 字母间不可留空格；
- (3) 最多只能有 19 个字母；
- (4) 变量名中的字母有大小写之分。

此外，MATLAB 中默认的变量名是 ans。

2. MATLAB 所定义的常用特殊变量

常见的 MATLAB 所定义的特殊变量有：

help	在线帮助命令,如用 help plot 调用命令函数 plot 的帮助说明
who	列出所有定义过的变量名称
ans	计算结果的变量名
eps	MATLAB 定义的正的极小值 = 2.2204e-16

pi	圆周率 π , 值为 3.14159265...
i(或 j)	虚数单位
inf	∞ 值, 无限大
NaN	非数

在定义变量名时, 注意不能与 MATLAB 中的特殊变量名称、库函数名称相同。

二、数据运算

1. 基本运算

在 MATLAB 下进行基本数据运算, 只需在命令窗口中提示号 “>>” 后将运算式直接键入并按 Enter 键 (以后的叙述中将符号 “ $\swarrow$ ” 表示按 Enter 键操作)。

【示例 1-1-3】 在 MATLAB 命令窗口中键入 “ $(5 * 2 + 1.3 - 0.8) * 10 / 25$ ” 并按 Enter 键。将得到 “ans=4.2000” 的显示。若想将上述运算式的结果赋给另一个变量 x, 则改成键入 “ $x = (5 * 2 + 1.3 - 0.8) * 10 / 25 \swarrow$ ”, 将得到 “x=4.2000” 的显示 [若不想让 MATLAB 显示运算结果, 只需在运算式结束处加上分号 “;” 即可。即 “ $x = (5 * 2 + 1.3 - 0.8) * 10 / 25; \swarrow$ ”。若在 x 算后又想要显示变量 x 的值, 可键入 “ $x \swarrow$ ”]。

由上例可知, MATLAB 可识别所有一般常用的加 “+”、减 “-”、乘 “*”、除 “/” 的数学运算符号, 以及幂次运算符号 “^”。

MATLAB 的运算符共分 5 类: 数学运算符、关系运算符、逻辑运算符、位运算符和集合运算符。

(1) 数学运算符: 按其优先级别依次为: ①转置 (.')、共轭转置 (')、幂 (.^)、矩阵幂 (^); ②正负号 (+/-); ③点乘 (.*)、乘 (*)、点除 (./)、除 (\, /); ④加减 (+, -); ⑤冒号 (:)。

(2) 六种关系运算符: 等于 (==)、不等于 (~=)、大于 (>)、大于等于 (>=)、小于 (<)、小于等于 (<=)。

(3) 三种逻辑运算符: 与 (&)、或 (|)、非 (~)。

(4) 位运算符 (功能是对非负整数进行位对位的逻辑运算): bitand、bitor、bitxor、bitset、bitget、bitcmp、bitshift。

(5) 集合运算符, 仅限于向量运算, 将向量视为集合来进行各种集合运算。

2. MATLAB 常用的基本数学函数

MATLAB 中常用的数学函数可参见表 1-1-1。

表 1-1-1

MATLAB 中常用的数学函数

函数名	功 能	函数名	功 能
abs(x)	绝对值或向量的模值	exp(x)	指数函数 e^x
angle(z)	复数 z 的相角 (Phase angle)	log(x)	自然对数
sqrt(x)	开平方	log10(x)	以 10 为底的对数
real(z)	复数 z 的实部	conj(z)	复数 z 的共轭复数
imag(z)	复数 z 的虚部	sign(x)	符号函数
sin(x)	正弦函数	asin(x)	反正弦函数
cos(x)	余弦函数	acos(x)	反余弦函数
tan(x)	正切函数	atan(x)	反正切函数

三、向量运算

1. 向量生成

向量包括行向量和列向量。在 MATLAB 中，向量是这样表示的：用左方括号 “[” 开始，以空格或逗号为间隔输入元素值，最后以右方括号 “]” 结束，生成的向量是行向量。列向量也是以左方括号开始，右方括号结束的，不过元素值之间使用分号或者回车键分隔。向量的生成除了直接输入外，还有以下三种生成方法生成行向量。列向量可以对行向量转置运算得到。

(1) 冒号法。

格式为： $x=a:b:c$ 。里生成的向量 x 是以 a 为初值， c 为终值， b 为公差的等差数列构成的行向量。冒号表示直接定义向量元素之间的增量，而不是向量元素的个数。若增量为 1（即 $b=1$ ），上面的格式可简写为： $x=a:c$ 。

【示例 1-1-4】 用冒号法生成向量，如图 1-1-4 所示。

```
>>x=0:0.5:2.5
x = 0    0.5000    1.0000    1.5000    2.0000    2.5000
```

图 1-1-4 [示例 1-1-4] 的运行结果

(2) 函数 linspace。

调用格式：`linspace (first_value, last_value, number)`

其功能是生成一个初值为 `first_value`，终值为 `last_value`，元素个数为 `number` 个的等差数列构造的行向量。由此可知，`linspace` 是通过直接定义元素个数，而不是元素之间的增量来创建向量的。

【示例 1-1-5】 用 `linspace` 函数生成向量，如图 1-1-5 所示。

```
>>x=linspace(0,5,8)
x = 0    0.7143    1.4286    2.1429    2.8571    3.5714    4.2857    5.0000
```

图 1-1-5 [示例 1-1-5] 的运行结果

该例子创建了一个从 0 开始，到 5 结束，包含 8 个元素的向量。

(3) 函数 logspace。

`logspace` 函数的调用格式：`logspace (first_value, last_value, number)`

该格式表示构造一个从初值为 $10^{\text{first_value}}$ ，终值为 $10^{\text{last_value}}$ ，元素个数为 `number` 个的行向量。`logspace` 函数功能相当对 `linspace` 函数产生的向量取以 10 为底的指数。

【示例 1-1-6】 `logspace` 函数与 `linspace` 函数关系举例，如图 1-1-6 所示。其中， $1.0e+005$ 为 10^5 ，“*”为乘号。上例生成的 y 向量的初值为 10^0 ，终值为 10^5 ，元素个数为 8。 y 与 z 相等，验证了 `logspace` 函数与 `linspace` 函数关系。

2. 向量的运算

(1) 向量与标量的四则运算：向量与标量之间的四则运算是指向量中的每个元素分别于

```

>>y=logspace(0,5,8)
y=1.0e+005 *
    0.0000    0.0001    0.0003    0.0014    0.0072    0.0373    0.1931    1.0000
>>x=linspace(0,5,8);
>>z=10.^x
z=1.0e+005 *
    0.0000    0.0001    0.0003    0.0014    0.0072    0.0373    0.1931    1.0000

```

图 1-1-6 [示例 1-1-6] 的运行结果

标量进行加减乘除运算。

(2) 向量间的运算：向量间的加减运算时，参与运算的向量必须具有相同的维数。乘除运算中，点乘“.”、“点除“./或“.\”，参与运算的向量必须具有相同的维数，点乘或点除为向量对应的元素相乘或相除；乘“*”、除“/或“\”必须满足线性代数中所学的矩阵相乘或相除的条件。

(3) 幂运算：向量的幂运算符为“.^”，为元素对元素的幂运算。

【示例 1-1-7】 幂运算，如图 1-1-7 所示。

```

>>x=0:5
x=0    1    2    3    4    5
>>y=x.^2
y=0    1    4    9    16    25

```

图 1-1-7 [示例 1-1-7] 的运行结果

向量的指数运算、对数运算和开方运算与幂运算的规则完全一样，是对元素的运算，运算函数分别为“exp”、“log 或 log10”、“sqrt”。

3. 向量元素的引用

向量元素的下标是从 1 开始的，对元素的引用格式为：变量名（下标）。对 [示例 1-1-7] 中变量 y 中的第三个元素引用的格式为 y(3)。

此外计算向量元素个数、最大值、最小值的函数分别为：length，max，min。

四、矩阵运算

1. 矩阵的定义

由 m 行 n 列构成的数组称为 (m×n) 阶矩阵；用 “[]” 方括号定义矩阵；用逗号或空格号分隔矩阵列元素；分号或“Enter” 回车键分隔矩阵行元素。对矩阵元素的存取可用 A(i, j)，其中 A 为变量名，i 为行号，j 为列号，A(i, j) 表示矩阵 A 内的第 i 行第 j 列的元素。矩阵元素可以为数值、变量、表达式或字符串；若为数值与变量得先赋值；表达式和变量可以以任何组合形式出现；字符串必须每一行中的字母个数相等。

2. 矩阵生成

在 MATLAB 中，矩阵的生成可按矩阵的定义输入，除此之外，可用矩阵函数定义。常

用的矩阵函数见表 1-1-2。

表 1-1-2 常用的 矩 阵 函 数

函 数 名	功 能
[m, n] =size(a) [d1, d2, d3, ..] =size(a)	返回矩阵的维数，m 为行数，n 为列数 对多维矩阵，第 N 个为矩阵第 N 维的长度
rot90(a) rot90(a, k)	矩阵逆时针旋转 90° k 参数定义为逆时针旋转 90×k°
eye(a) eye(a, k)	生成 a 阶单位方阵 生成 a×k 阶单位矩阵
ones(a) ones(a, k)	生成 a 阶全 1 方阵 生成 a×k 阶全 1 矩阵
zeros(a) zeros(a, k)	生成 a 阶全 0 方阵 生成 a×k 阶全 0 矩阵
inv(a)	生成 a 的逆矩阵
rank(a)	求矩阵的秩
det(a)	求行列式的值
eig 或 eigs	求矩阵的特征值和特征向量
ploy	求矩阵的特征多项式
polyvalm	求矩阵特征多项式的值
sqrtn	矩阵开方运算
expm	矩阵指数运算

3. 矩阵运算

(1) 加减。

$C = A \pm B$ 两矩阵相加减,要求两矩阵具有相同的行数,相同的列数。

【示例 1-1-8】 两矩阵相加，如图 1-1-8 所示。

```
>>A=[1 2;3 4];B=[5 6;7 8];C=A+B
C=   6   8
     10  12
```

图 1-1-8 [示例 1-1-8] 的运行结果

(2) 乘除。

- $k * A$ 数量 k 与矩阵 A 相乘,将 A 的每个元素都乘以 k
- $C = A * B$ 两矩阵 A,B 相乘,要求两个矩阵的相邻阶数相等
- $C = A/B$ 右除 --- A,B 列数相同
- $C = A \backslash B$ 左除 --- A,B 行数相同