



“十三五”普通高等教育本科规划教材



“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

(第三版)

杨平 余洁 徐春梅 徐晓丽 编著



扫码获取资源

- 基础+实验+实践
- 诸多应用实例
- 课内实验答案



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

“十三五”普通高等教育本科规划教材



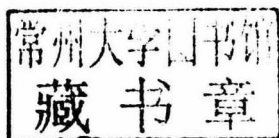
“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

# 自动控制原理

## ——实验与实践篇

(第三版)

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“十三五”普通高等教育本科规划教材。

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. —3 版. —北京：中国电力出版社，2019.2

“十三五”普通高等教育本科规划教材

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

ISBN 978-7-5198-2332-0

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 (2018) 第 188969 号

---

出版发行：中国电力出版社

地 址：北京市东城区北京站西街 19 号（邮政编码 100005）

网 址：<http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑：周巧玲

责任校对：黄 蓓 常燕昆

装帧设计：郝晓燕

责任印制：钱兴根

---

印 刷：北京天宇星印刷厂

版 次：2011 年 10 月第一版 2015 年 8 月第二版

印 次：2019 年 2 月第三版 2019 年 2 月北京第六次印刷

开 本：787 毫米×1092 毫米 16 开本

印 张：15.75

字 数：389 千字

定 价：42.00 元

---

版 权 专 有 侵 权 必 究

本书如有印装质量问题，我社营销中心负责退换

# 前 言

学习自动控制原理课程有多种方式,包括自学、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必不可少的组成部分。在许多高校已经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一门独立课程,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。从20世纪80年代起至今发生了许多变化。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机的使用不但可以将实验结果随时记录和绘图显示,还增加了根轨迹图和频率特性图分析等实验项目;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。本书所依据的主要实验设备就是装有MATLAB软件的PC机。

有的老师主张用电子模拟装置,认为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。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(第三版)》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。

本书提供第1篇和第2篇课内实验答案,手机扫码即可查看。

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过程特别

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、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）。在此基础上有了中国电力出版社 2011 年版的“自动控制原理——实验与实践篇”（杨平、余洁、徐春梅、徐晓丽编著）。此次修订主要改动是第 1 篇增加了第 4 章，第 2 篇的 8 章重新编写，第 3 篇删了 1 章又增加或改动 3 节。改编的目标是，精炼和优化控制原理实验技术，增强控制原理实验课和理论课的协调配合度，力求满足控制原理教学阶段的本科专业人才培养的实际需要。本书的第 1 篇由徐春梅改写或新写，第 2 篇由余洁改写或新写，第 3 篇由徐晓丽改写或新写，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 yangping1201@126.com，直接给予批评指正。

编者  
2018 年 10 月



扫码查看本书配套资源

# 目 录

前言

## 第1篇 基础篇

<b>第1章 MATLAB 基础</b> .....	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 .....	11
1.1.5 图形处理 .....	13
1.1.6 M 文件编程 .....	18
1.1.7 课内实验 .....	23
1.1.8 课外实验 .....	23
<b>第2章 Simulink 基础</b> .....	25
1.2.1 Simulink 基本操作 .....	25
1.2.2 输入信号模块设置 .....	32
1.2.3 仿真过程设置 .....	34
1.2.4 输出模块设置 .....	38
1.2.5 课内实验 .....	40
1.2.6 课外实验 .....	40
<b>第3章 计算机仿真基础</b> .....	42
1.3.1 计算机仿真概述 .....	42
1.3.2 计算机仿真的基本原理 .....	43
1.3.3 计算机仿真试验 .....	51
1.3.4 课内实验 .....	53
1.3.5 课外实验 .....	54
<b>第4章 学术论文写作基础</b> .....	55
1.4.1 学术论文概述 .....	55
1.4.2 学术论文类型与结构 .....	55
1.4.3 学术论文写作方法 .....	56
1.4.4 学术论文写作规范 .....	57
1.4.5 控制原理实验报告写作指导 .....	59

## 第2篇 实验篇

<b>第1章 控制系统的数学模型</b> .....	61
2.1.1 系统数学模型的 MATLAB 生成 .....	61
2.1.2 系统数学模型间的转换 .....	66
2.1.3 环节模型间的连接 .....	70
2.1.4 阶跃响应实验建模 .....	73
2.1.5 课内实验 .....	77
2.1.6 课外实验 .....	78
<b>第2章 控制系统的时域分析</b> .....	79
2.2.1 控制系统时域响应的仿真及分析 .....	79
2.2.2 控制系统的稳定性分析 .....	91
2.2.3 控制系统的稳态误差计算 .....	93
2.2.4 Simulink 模型系统的时域仿真及性能分析 .....	95
2.2.5 课内实验 .....	100
2.2.6 课外实验 .....	100
<b>第3章 控制系统的时域设计</b> .....	102
2.3.1 控制系统设计概要 .....	102
2.3.2 PID 控制系统 .....	102
2.3.3 串级控制系统 .....	113
2.3.4 前馈控制系统 .....	115
2.3.5 延迟补偿控制系统 .....	116
2.3.6 课内实验 .....	118
2.3.7 课外实验 .....	118
<b>第4章 控制系统的根轨迹分析与设计</b> .....	119
2.4.1 根轨迹的绘制及分析 .....	119
2.4.2 控制器的根轨迹法设计 .....	128
2.4.3 根轨迹控制器设计工具——rltool 设计平台 .....	134
2.4.4 课内实验 .....	138
2.4.5 课外实验 .....	138
<b>第5章 控制系统的频域分析及设计</b> .....	140
2.5.1 系统的频率响应计算 .....	140
2.5.2 Nyquist 图的绘制及分析 .....	141
2.5.3 Bode 图的绘制及分析 .....	144
2.5.4 Nichols 图的绘制 .....	149
2.5.5 控制器的频域法设计 .....	150
2.5.6 课内实验 .....	160

2.5.7	课外实验 .....	160
<b>第6章</b>	<b>离散控制系统分析与设计</b> .....	162
2.6.1	离散控制系统的数学模型 .....	162
2.6.2	离散控制系统的分析 .....	166
2.6.3	离散控制系统的设计 .....	170
2.6.4	离散控制系统的 Simulink 模型与仿真 .....	172
2.6.5	课内实验 .....	178
2.6.6	课外实验 .....	179
<b>第7章</b>	<b>状态变量控制系统的分析与设计</b> .....	180
2.7.1	状态空间模型的分析 .....	180
2.7.2	能控性和能观性判定及结构分解 .....	183
2.7.3	状态反馈控制器的设计 .....	187
2.7.4	状态观测器的设计 .....	189
2.7.5	课内实验 .....	190
2.7.6	课外实验 .....	191
<b>第8章</b>	<b>非线性控制系统分析</b> .....	192
2.8.1	非线性系统的 Simulink 的建模仿真 .....	192
2.8.2	非线性系统的描述函数法应用 .....	194
2.8.3	基于 Simulink 的相平面图绘制 .....	197
2.8.4	课内实验 .....	199
2.8.5	课外实验 .....	199

## 第3篇 实践篇

<b>第1章</b>	<b>控制原理应用实践导论</b> .....	201
3.1.1	控制原理应用实践的技术路线 .....	201
3.1.2	控制技术应用概要 .....	202
3.1.3	控制原理应用实践报告写作要点 .....	204
<b>第2章</b>	<b>飞行控制</b> .....	206
3.2.1	飞机俯仰角度控制 .....	206
3.2.2	飞机机动襟翼角的计算机控制 .....	207
3.2.3	航天飞机的俯仰控制 .....	208
<b>第3章</b>	<b>车行控制</b> .....	209
3.3.1	电传动内燃机车的速度控制 .....	209
3.3.2	汽车主动悬挂控制 .....	209
3.3.3	磁悬浮列车的空气隙控制 .....	210
<b>第4章</b>	<b>船行控制</b> .....	212
3.4.1	水翼船渡轮的纵倾角控制 .....	212

3.4.2	船舶航向的自动操舵控制 .....	212
<b>第5章</b>	<b>工业过程控制</b> .....	214
3.5.1	无刷直流电机转速控制 .....	214
3.5.2	单容水箱水位控制 .....	214
3.5.3	铣床切削深度控制 .....	215
3.5.4	电网频率的一次调节 .....	216
3.5.5	核电站压水堆一回路水温控制 .....	216
3.5.6	双容水箱水温控制 .....	217
3.5.7	电站锅炉过热汽温控制 .....	217
3.5.8	电站锅炉水位控制 .....	219
<b>第6章</b>	<b>倒立摆控制装置</b> .....	221
3.6.1	直线型倒立摆实验装置 .....	221
3.6.2	直线一级倒立摆机理建模 .....	222
3.6.3	直线一级倒立摆的PID控制 .....	225
3.6.4	直线一级倒立摆的状态反馈控制 .....	228
3.6.5	倒立摆控制实践课题 .....	230
<b>第7章</b>	<b>电阻炉温度控制装置</b> .....	231
3.7.1	电阻炉温度控制装置简介 .....	231
3.7.2	电阻炉温度控制过程仿真实验 .....	232
3.7.3	电阻炉温度控制过程实时监控 .....	233
3.7.4	电阻炉温度控制实践课题 .....	236
<b>附录</b>	<b>Simulink 模块库图标和名称一览表</b> .....	237
<b>参考文献</b>	.....	242

# 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。MathWorks 公司每年都会优化 MATLAB 的功能, 推出新的版本。

MATLAB 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 提供了和 C 语言几乎一样多的运算符, 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简化程序, 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) 工具箱功能强大。MATLAB 的工具箱可分为功能性工具箱和学科性工具箱两类。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、文字处理功能及与硬件实时交互功能。而学科性工具箱专业性比较强, 包括控制工具箱、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, 用户可通过修改源文件或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, 或在 MATLAB 的安装路径中找到可执行文件 Matlab.exe 来启动 MATLAB。

#### 2. MATLAB 操作界面

图 1-1-1 所示为默认设置情况下的 MATLAB 操作界面, 它包含以下 4 个窗口。

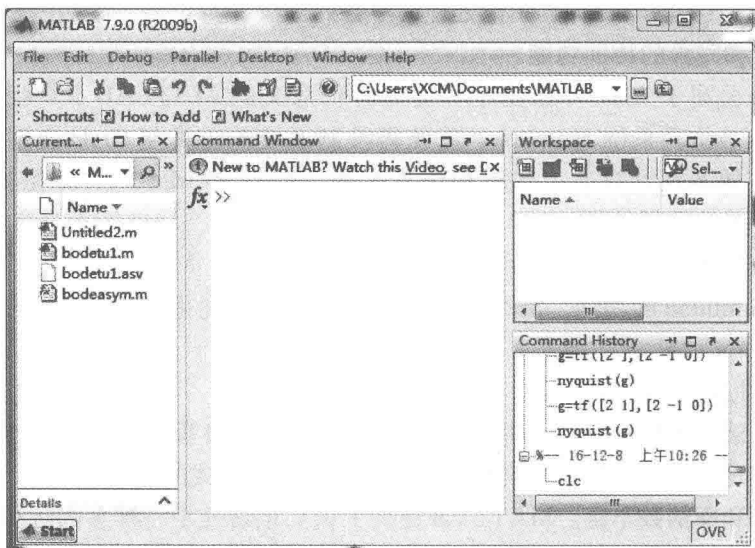


图 1-1-1 MATLAB 的工作界面

(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  $\gg$  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): 记录已运行过的 MATLAB 命令, 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。

### 3. MATLAB 的退出

退出 MATLAB 软件系统, 有下面 4 种方法:

- (1) 单击 MATLAB 主窗口的“关闭”按钮。
- (2) 在命令窗口输入 `exit` 或者 `quit` 命令。
- (3) 选择“File”菜单中的“Exit MATLAB”。
- (4) 用快捷命令 `Ctrl+Q`。

## 二、MATLAB 帮助系统

MATLAB 提供了数目繁多的函数和命令, 很难全部记住。可行的办法是先掌握基本内容, 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。可以通过操作界面的“Help”菜单获得帮助, 也可以通过工具栏的帮助选项获得帮助, 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`、`doc` 等。

(1) `help` 指令。`help` 指令是 MATLAB 中最有用的指令之一, 用法如下:

<code>help</code>	弹出在线帮助总览窗
<code>help</code> 函数名	查询具体函数的详细信息, 通常会有少量的示例
<code>help elfun</code>	寻求关于基本函数的帮助
<code>help help</code>	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名称, 但知道函数功能的时候, 就可以通过 `lookfor` 搜索该功能的关键词。

**【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。

输入 `lookfor image`, 可知与 `image` 相关的函数名有很多个, 如图 1-1-2 所示, 图 1-1-2 只列出其中的一部分。

(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头的命令。

```

>> lookfor image
HeatMap      -A false color 2D image of the data values in a matrix.
imagemodel   -Access to properties of an image relevant to its display.
cfrimage     -Image.
cmunique     -Eliminate unneeded colors in colormap of indexed image.
imapprox     -Approximate indexed image by one with fewer colors.
contrast     -Gray scale color map to enhance image contrast.
dither       -Convert image using dithering.
frame2im     -Return image data associated with movie frame.
im2frame     -Convert indexed image into movie format.
im2java      -Convert image to Java image.
image        -Display image.
imagesc      -Scale data and display as image.
...          ...

```

图 1-1-2 [例 1-1-1] 运行结果

**【例 1-1-2】** 查询以 plot 开头的命令。

输入 plot，按 Tab 键，弹出如图 1-1-3 所示的下拉框，即可选择需要的命令。用户可以通过 help 命令查询所需命令的详细信息。

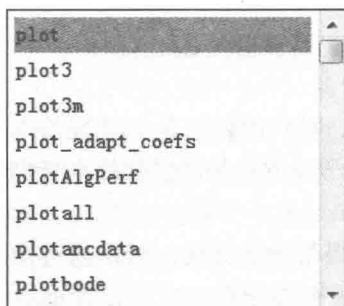


图 1-1-3 [例 1-1-2] 运行结果

### 三、MATLAB 演示系统

MATLAB 软件提供了很好的演示系统，为用户提供了图文并茂的演示案例，对初学者有很大的帮助。进入演示系统（demo）有下面 4 种途径：

- (1) 选择“Help”菜单下的“Demos”。
- (2) 在命令窗口输入“demo”命令。
- (3) 直接在帮助页面上选择“demos”页。
- (4) 在主窗口左下角“Start”菜单中选择“demos”。

## 1.1.3 数值运算

用 MATLAB 进行数值运算时，首先要按照预定规则命名变量，其次按照不同的数据结构形式分类进行标量运算、向量运算、矩阵运算、数组运算和多项式运算。

### 一、变量

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；⑤变量名称中不能包含标点符号。此外，MATLAB 中默认的变量名是 ans。

常见的 MATLAB 所定义的特殊变量如下：

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 $\pi$ , 值为 3.14159265...
i(或 j)	虚数单位
inf	$\infty$ 值, 无限大
NaN	非数

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

## 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“>>”后直接输入运算式并按 Enter 键。以后的叙述中以符号“↵”表示按 Enter 键。

**【例 1-1-3】** 在 MATLAB 命令窗口中输入“(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, 则改成输入“x=(5 \* 2 + 1.3 - 0.8) \* 10 / 25 ↵”, 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; ↵”。若在 x 算后又想要显示变量 x 的值, 可输入“x ↵”]。

由 [例 1-1-3] 可知, MATLAB 可识别所有一般常用的加“+”、减“-”、乘“\*”、除“/”的数学运算符号及幂次运算符号“^”。

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转置 (.')、共轭转置 (')、幂 (.^)、矩阵幂 (^); 正负号 (+/-); 点乘 (. \* )、乘 (\* )、点除 (. \ , ./)、除 (\ , /); 加减 (+, -); 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 中常用的数学函数见表 1-1-1。

表 1-1-1 MATLAB 中常用的数学函数

函数名	功能 (单位)	函数名	功能 (单位)
sin (x)	正弦函数 (rad)	asin (x)	反正弦函数 (rad)
sind (x)	正弦函数 (°)	asind (x)	反正弦函数 (°)
cos (x)	余弦函数 (rad)	acos (x)	反余弦函数 (rad)
cosd (x)	余弦函数 (°)	acosd (x)	反余弦函数 (°)
tan (x)	正切函数 (rad)	atan (x)	反正切函数 (rad)

续表

函数名	功能(单位)	函数名	功能(单位)
tand(x)	正切函数(°)	atand(x)	反正切函数(°)
abs(x)	绝对值或向量的模值	angle(z)	复数 $z$ 的相角(rad)
real(z)	复数 $z$ 的实部	imag(z)	复数 $z$ 的虚部
exp(x)	指数函数 $e^x$	log(x)	自然对数
log10(x)	以10为底的对数	sqrt(x)	开平方

### 三、向量运算

#### 1. 向量生成

向量包括行向量和列向量。在 MATLAB 中,向量的表示是用左方括号“[”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 Enter 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:  $x=a:b:c$

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  $x=a:c$ 。

**【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 [例 1-1-4] 运行结果

##### (2) 函数 linspace。

调用格式:  $\text{linspace}(\text{first\_value}, \text{last\_value}, \text{number})$

其功能是生成一个初值为  $\text{first\_value}$ , 终值为  $\text{last\_value}$ , 元素个数为  $\text{number}$  个的等差数列构造的行向量。由此可知,  $\text{linspace}$  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。

**【例 1-1-5】** 用  $\text{linspace}$  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 [例 1-1-5] 运行结果

[例 1-1-5] 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。

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。

**【例 1-1-6】** logspace 函数与 linspace 函数关系举例, 如图 1-1-6 所示。

```

>>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 [例 1-1-6] 运行结果

其中,  $1.0e+005$  为  $10^5$ , \* 为乘号。[例 1-1-6] 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与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。

**【例 1-1-7】** 幂运算, 如图 1-1-7 所示。

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 [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  $m \times n$  阶矩阵; 用 “[ ]” 方括号定义矩阵; 用逗号或空格分隔矩阵列元素; 分号或 Enter 键分隔矩阵行元素。对矩阵元素的存取可用  $A(i, j)$ , 其

```

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

```

图 1-1-7 [例 1-1-7] 运行结果

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; 若为数值与变量应先赋值; 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
eye (a) eye (a, k)	生成 a 阶单位方阵 生成 $a \times k$ 阶单位矩阵
ones (a) ones (a, k)	生成 a 阶全 1 方阵 生成 $a \times k$ 阶全 1 矩阵
zeros (a) zeros (a, k)	生成 a 阶全 0 方阵 生成 $a \times k$ 阶全 0 矩阵
rand (a, k)	生成 $a \times k$ 阶均匀分布随机矩阵, 元素值的范围 0~1
[m, n] = size (a)	返回矩阵的维数, m 为行数, n 为列数
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
poly	求矩阵的特征多项式
sqrtn	矩阵开方运算
expm	矩阵指数运算

## 3. 矩阵元素引用

矩阵中的元素可用下标方式引用, 因为矩阵是二维数组, 所以用行下标和列下标表示。设  $a$  为一个  $m \times n$  阶矩阵, 其第  $i$  行第  $j$  列的元素用  $a(i, j)$  表示, 第  $i$  行元素的调用格式为  $a(i, :)$ , 第  $j$  列元素的调用格式为  $a(:, j)$ 。设  $a = [4 \ 2 \ 0; 1 \ 3 \ 5]$ , 在命令窗口里输入 “ $a = [4 \ 2 \ 0; 1 \ 3 \ 5]; a(2, 3)$ ”, 返回的值为  $ans = 5$ ; 若再输入 “ $a(1, :)$ ”, 则返回  $ans = 4 \ 2 \ 0$ ; 若再输入 “ $a(:, 2)$ ”, 则返回  $ans = 2; 3$ 。

## 4. 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。

**【例 1-1-8】** 两矩阵相加, 如图 1-1-8 所示。

### (2) 乘除。