

普通高等教育应用型本科“十二五”规划教材

自动控制原理 实验与实践

主编 王素青



国防工业出版社

National Defense Industry Press

普通高等教育应用型本科“十二五”规划教材

自动控制原理实验与实践

主编 王素青

副主编 沈莉丽 侯瑞

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书是《自动控制原理》理论课程的配套实验和实践教材,以“自动控制原理”课程的理论教学大纲为基础,结合现代先进的实验教学方法,精心设计了8个基础性实验和4个综合系统设计项目,较全面地涵盖了经典控制理论知识的重点和难点。本书共分8章,第1章为MATLAB与Simulink基础,主要从应用角度介绍MATLAB软件以及Simulink建模仿真的方法;第2~5章分别介绍线性系统的时域分析法、根轨迹法、频域分析法和校正的理论知识,每章均附有多个应用MATLAB软件技术解决自动控制理论问题的具体实例;第6章为基础性实验,精选的8个实验项目内容涵盖了多个知识点;第7章为综合系统设计,包括直流电机调速系统、步进电机调速系统、温度控制系统以及直线一级倒立摆控制系统;第8章为实验平台,对硬件实验平台和软件实验环境进行介绍。

本书可作为高等学校自动化、电气工程及其自动化、测控技术与仪器等专业“自动控制原理”课程的实验与实践教材,也可作为设计开发自动控制系统的工程技术人员的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理实验与实践 / 王素青主编. —北京:
国防工业出版社, 2015. 10
普通高等教育应用型本科“十二五”规划教材
ISBN 978 - 7 - 118 - 10558 - 2

I. ①自… II. ①王… 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 249575 号

※

国防工业出版社 出版发行
(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)
北京奥鑫印刷厂印刷
新华书店经售

*

开本 787 × 1092 1/16 印张 12½ 字数 285 千字
2015 年 10 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 28.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777
发行传真:(010)88540755

发行邮购:(010)88540776
发行业务:(010)88540717

前 言

“自动控制原理”是一门理论性和实践性都很强的专业基础课,是自动化、电气工程及其自动化、测控技术与仪器等工科类专业的必修课程。加强实验教学,不仅有助于理论联系实际,深化理论教学,而且有助于培养学生的科学实验和工程实践能力。本书旨在通过实验与实践巩固和加深学生对自动控制原理中的基础理论和基本概念的理解,应用基础知识解决实际问题的能力,培养学生知识综合应用能力和创新能力。

本书是“自动控制原理”理论课程的配套实验和实践教材,也是“自动控制原理实验”课程的使用教材,是以“自动控制原理”课程的理论教学大纲为基础,结合现代先进的实验教学方法,精心设计了 12 个实验项目,较全面地涵盖了经典控制理论知识的重点和难点。

MATLAB 是一套高性能的数值计算和可视化软件,集数值分析、矩阵运算、信号处理和图形显示于一体,构成了一个界面友好的用户环境。MATLAB 已经成为国际、国内控制领域内最流行的、被广泛应用的控制系统计算、仿真与计算机辅助设计的软件。Simulink 是基于 MATLAB 的框图设计环境,可以用来对各种动态系统进行建模、仿真和分析的软件。

本书共分 8 章,第 1 章介绍 MATLAB 与 Simulink 的基础知识,并用实例来介绍软件和工具箱的具体使用方法;第 2~5 章按照自动控制原理知识体系分别介绍线性系统的时域分析法、根轨迹法、频域分析法和校正的理论知识,每章均附有多个实例,介绍如何用 MATLAB 软件技术来解决自动控制理论中具体问题的方法;第 6 章为基础性实验,精选的 8 个实验项目内容涵盖了多个知识点,包括 3 个硬件实验和 5 个软件仿真实验,每个实验项目都包含实验目的、实验原理、实验内容 with 要求、实验步骤、实验仪器与设备、预习要求和实验报告要求等;第 7 章为综合系统设计,包括直流电机调速系统、步进电机调速系统、温度控制系统以及直线一级倒立摆控制系统,这 4 个综合系统设计项目均是工程中经典的,要求学生具备利用自动控制原理理论知识解决实际控制系统的能力。其中,直流电机调速系统项目中还要求学生掌握 PID 控制原理及 PID 控制参数的工程整定方法;第 8 章为实验平台,对硬件实验平台和软件实验环境进行介绍。

本书设计的 8 个实验项目和 4 个综合系统设计项目,均是编者通过多年来的实践教学经验而精心选择的,自编讲义已使用 9 年,根据学生在实验过程中出现的一些问题,对自编讲义的内容进行不断地修改,最终编写成本书。本书的实验内容不仅在教学上具有典型性和代表性,而且在实验技术上具有实践性和应用性。实验项目既有硬件实验,又有软件仿真实验。硬件实验是要求学生在实验平台上自行搭建模拟系统来分析验证系统特性,通过一系列项目设计要求完成控制系统设计实验。软件实验是利用 MATLAB 软件或 Simulink 工具箱来对控制系统进行分析和设计,不仅能帮助学生理解自动控制原理理论

课的理论知识,还能方便快速地对系统进行分析和设计。

本书由王素青、沈莉丽、侯瑞共同编写。第1章和第3章由沈莉丽编写;第2章、第4章和第5章由侯瑞编写;第6章、第7章和第8章由王素青编写;全书由王素青统稿。

本书在编写过程中得到了许多专家和老师的的大力支持与帮助,他们对教材的编写提出了宝贵的意见,在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,时间仓促,书中的错误及不足之处在所难免,恳请广大读者批评指正,并请与编者联系,联系邮箱为 wsq0214@nuaa.edu.cn。

编 者

2015 年 7 月

目 录

第1章	MATLAB 与 Simulink 基础	1
1.1	MATLAB 基础	1
1.1.1	MATLAB 概述	1
1.1.2	MATLAB 环境	2
1.1.3	MATLAB 数值运算	5
1.1.4	MATLAB 符号运算	10
1.1.5	MATLAB 图形处理	11
1.1.6	MATLAB 程序设计	18
1.1.7	线性控制系统分析与设计	24
1.2	Simulink 基础	33
1.2.1	Simulink 概述	33
1.2.2	Simulink 的使用	34
1.2.3	常用模块的参数和属性设置	37
1.2.4	Simulink 模块的操作	43
1.2.5	模块的连接	45
1.2.6	Simulink 仿真配置	46
第2章	线性系统的时域分析法	51
2.1	系统时间响应的性能指标	51
2.2	典型输入信号	52
2.3	一阶系统的时域分析	54
2.3.1	一阶系统的数学模型	54
2.3.2	一阶系统的单位阶跃响应	55
2.3.3	一阶系统的单位脉冲响应	56
2.3.4	一阶系统的单位斜坡响应	56
2.4	二阶系统的时域分析	57
2.4.1	二阶系统数学模型	57
2.4.2	二阶系统的单位阶跃响应	59
2.4.3	二阶系统阶跃响应的性能指标	60
2.4.4	二阶系统性能改善	60
2.5	线性系统的稳定性分析	62
2.5.1	稳定性的基本概念	62

2.5.2	线性系统稳定的充分必要条件	63
2.5.3	劳斯—赫尔维茨稳定判据	63
2.6	线性系统的稳态误差	64
2.6.1	误差分析及计算	64
2.6.2	系统类型	65
2.6.3	给定信号作用下的稳态误差	65
2.6.4	提高系统稳态精度的方法	66
2.7	MATLAB 在时域分析中的应用	66
第3章	线性系统的根轨迹法	71
3.1	根轨迹法基本知识	71
3.1.1	根轨迹法概念	71
3.1.2	根轨迹与系统性能	71
3.1.3	根轨迹方程	72
3.1.4	根轨迹绘制基本法则	73
3.2	根轨迹的绘制与分析	74
3.3	基于根轨迹的设计工具 rltool	77
3.4	线性定常系统仿真环境 LTI Viewer	79
第4章	线性系统的频域分析法	82
4.1	频率特性	82
4.1.1	频率特性的概念	82
4.1.2	频域性能指标	83
4.1.3	频率特性的性质	83
4.1.4	频率特性的求取	84
4.1.5	频率特性的几何表示法	84
4.2	典型环节的频率特性	85
4.3	开环系统的对数频率特性	89
4.4	最小相位系统	90
4.5	频域稳定判据与稳定性分析	90
4.6	用频域特性分析系统性能	92
4.6.1	闭环频域性能指标与时域性能指标的关系	92
4.6.2	开环频率特性与时域响应的关系	94
4.7	MATLAB 在频域分析中的应用	95
第5章	线性系统的校正	98
5.1	系统设计及校正方法	98
5.1.1	系统的性能指标	98
5.1.2	系统的校正方式	98
5.2	线性系统的基本控制规律	99

5.2.1	比例(P)控制规律	100
5.2.2	比例—微分(PD)控制规律	100
5.2.3	积分(I)控制规律	101
5.2.4	比例—积分—微分(PID)控制规律	101
5.3	校正装置及其特性	102
5.3.1	超前校正装置	102
5.3.2	滞后校正装置	104
5.3.3	滞后—超前校正装置	105
5.4	频率法串联校正	107
5.4.1	频率法串联超前校正	108
5.4.2	频率法串联滞后校正	108
5.4.3	频率法串联滞后—超前校正	109
5.4.4	按期望特性对系统进行串联校正	109
5.5	反馈校正	110
5.5.1	反馈校正的原理与特点	110
5.5.2	反馈校正基本控制规律	111
5.5.3	综合法反馈校正	112
5.6	复合校正	113
5.6.1	反馈控制与前馈校正的复合校正	113
5.6.2	反馈控制与扰动补偿校正的复合校正	114
5.7	基于 MATLAB 的线性控制系统校正	114
第 6 章	基础性实验	119
6.1	线性控制系统的时域分析	119
6.2	基于 Simulink 的自动控制系统仿真研究	123
6.3	根轨迹法校正	129
6.4	线性控制系统的频域分析	135
6.5	用频域法设计串联超前校正网络	139
6.6	用频域法设计串联滞后校正网络	143
6.7	MATLAB 软件在控制系统中的应用	147
6.8	用频域法设计串联滞后—超前校正网络	151
第 7 章	综合系统设计	156
7.1	直流电动机闭环调速系统设计	156
7.2	步进电动机调速系统设计	162
7.3	温度闭环控制系统设计	166
7.4	直线一级倒立摆控制系统设计	169
第 8 章	实验平台	177
8.1	硬件实验平台	177

8.1.1	实验箱主实验板	177
8.1.2	实验区的介绍	179
8.2	软件实验环境—虚拟示波器	185
8.2.1	虚拟示波器的显示方式	185
8.2.2	虚拟示波器的使用	186
8.3	AEDK-labACT 验机步骤	189
参考文献		191

第 1 章 MATLAB 与 Simulink 基础

1.1 MATLAB 基础

1.1.1 MATLAB 概述

MATLAB(Matrix Laboratory,矩阵实验室)是 MathWorks 公司开发的,目前国际上最流行、应用最广泛的科学与工程计算软件。

MATLAB 具有强大的矩阵计算功能和良好的图形可视化功能,为用户提供了非常直观的、简洁的程序开发环境,被誉为“巨人肩上的工具”,在信号处理、图像处理、控制系统辨识、模糊控制以及神经网络等学科领域都有广泛的发展。

MATLAB 提供了很多专用的工具箱,如控制系统工具箱(Control System Toolbox)、信号处理工具箱(Signal Processing Toolbox)等。控制系统工具箱主要是运用经典控制理论处理线性时不变(LTI)系统的函数集合,为 LTI 定常系统的建模、分析和设计提供了完整的解决方案。另一个框图式操作界面工具——单输入单输出(Single Input/Single Output, SISO)系统设计工具,可用于单输入单输出反馈控制系统的补偿器校正设计。

MATLAB 还有一个重要的软件包就是动态仿真集成环境 Simulink。Simulink 与用户的交互接口基于 Windows 模型化图形输入,使得用户可以把更多的精力投入到系统模型的构建,而非语言的编程上。所谓模型化图形输入是指 Simulink 提供了一些按功能分类的基本系统模块,用户只需要知道这些模块的输入输出及模块的功能,而不必研究模块内部是如何实现的。通过对这些基本模块的调用,再将它们连接起来就可以构成所需要的系统模型,然后进行仿真分析与设计。

MATLAB 集科学与工程计算、图形可视化、图像处理、多媒体处理于一体,并提供了 Windows 图形界面设计方法。MATLAB 语言有以下特点:

1. 功能强大

MATLAB 语言的功能强大体现在以下两个方面:

1) 强大的科学运算功能

MATLAB 是以复数矩阵为基本编程单元的程序设计语言,其强大的运算功能使其成为世界顶尖的数学应用软件之一。

MATLAB 的数值运算要素不是单个数据,而是矩阵,每个变量代表一个矩阵,矩阵有 $m \times n$ 个元素,每个元素都可视为复数,所有的运算包括加、减、乘、除和函数运算等都对矩阵和复数有效;另外,通过 MATLAB 的符号工具箱,可以解决在数学、应用科学和工程计算领域中常遇到的符号计算问题。

2) 功能强大的模块工具箱

MATLAB 对很多专门的领域都开发了功能强大的模块工具箱,一般来讲,它们都是

由特定领域的专家开发的,用户可以直接使用工具箱,而不需要自己编写代码,例如数据采集、概率统计、优化算法、神经网络、小波分析、模型预测、电力系统仿真等,都在工具箱家族中有自己的一席之地,使 MATLAB 适用于不同领域。

2. 人机界面友好,编程效率高

MATLAB 的语言规则与笔算式相似,矩阵的行列数无须定义,MATLAB 的命令表达方式与标准的数学表达式非常相近,易写、易读并易于交流。

MATLAB 是以解释方式工作的,即它对每条语句解释后立即执行,输入算式无须编译立即得到结果,若有错误也立即做出反应,便于编程者立即改正,减轻了编程和调试的工作量,提高了编程效率。

3. 强大而智能化的图形处理功能

MATLAB 自产生以来,就具有方便的数据可视化功能,能将向量和矩阵用图形表现出来,并且可以对图形进行标注和打印。高层次的作图包括二维和三维的可视化、图像处理、动画和表达式作图。

MATLAB 还可以方便地将工程计算的结果可视化,使原始数据的关系更加清晰明了,并揭示数据间的内在联系。

4. 可扩展性强

MATLAB 软件包括基本部分和工具箱两大部分,具有良好的可扩展性。MATLAB 的函数可以直接编辑和修改,MATLAB 的工具箱可以任意增减。

MATLAB 允许用户编写可以和 MATLAB 进行交互的 C 或 C++ 语言程序。另外,MATLAB 网页服务程序还容许在 Web 应用中使用自己的 MATLAB 数学和图形程序。

5. Simulink 动态仿真功能

MATLAB 的 Simulink 提供了动态仿真的功能,用户通过绘制框图模拟线性、非线性、连续或离散的系统,通过 Simulink 能够仿真并分析该系统。

1.1.2 MATLAB 环境

MATLAB 既是一种高级计算机语言,又是一个编程环境。MATLAB 的系统界面,通常是指这个软件系统所具有的各种界面里的诸多菜单命令、工具栏按钮与对话框。通过对其操作,可以运行并管理系统,生成、编辑与运行程序,管理变量与工作空间,输入输出数据与相关信息以及生成与管理 M 文件等。

1. 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 的操作界面;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 启动后的操作界面如图 1.1.1 所示。

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,主要由菜单、工具栏、命令窗口、工作空间窗口、命令历史窗口和当前目录窗口组成,它们可重叠在一起,也可独立分离,窗口可根据用户需求调节大小。

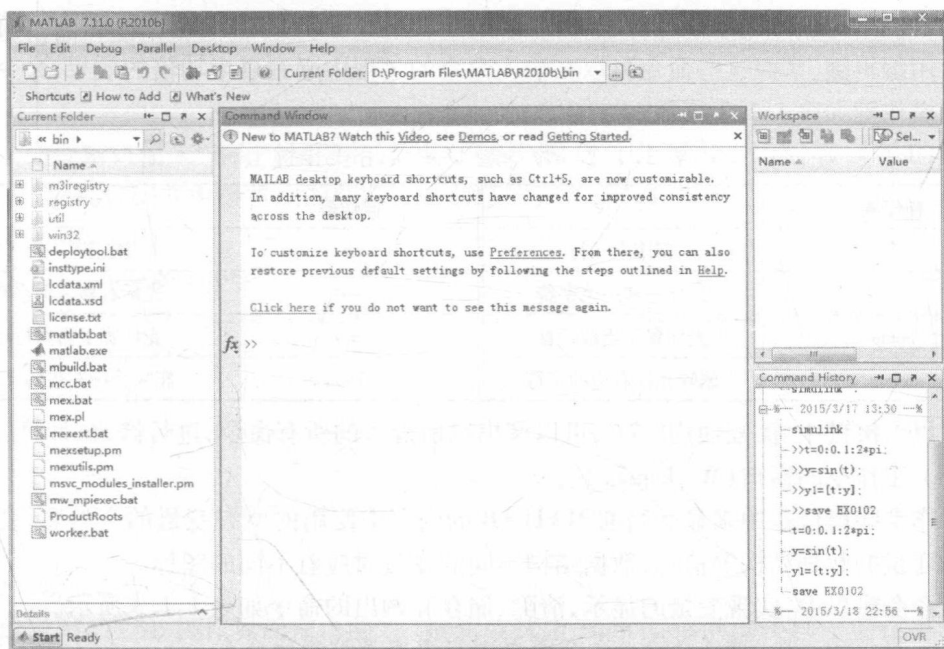


图 1.1.1 MATLAB R2010b 界面

(1) 菜单和工具栏。

MATLAB 的菜单和工具栏界面与 Windows 程序的界面类似,只要稍加实践就可以掌握其功能和使用方法。

(2) 命令窗口(Command Window)。

MATLAB 命令窗口是用来接受 MATLAB 命令的窗口。在命令窗口中直接输入命令,可以实现显示、清除、储存、调出、管理、计算和绘图等功能。MATLAB 命令窗口中的符号“>>”为命令提示符,表示 MATLAB 处于准备状态。当在提示符后输入一段程序或一段运算式后按回车键,MATLAB 会给出计算结果并将其保存在工作空间管理窗口中,然后再次进入准备状态。

在命令窗口中实现管理功能的常用命令如表 1.1.1 所示。

表 1.1.1 命令窗口中常用命令

命令	含 义
cd	显示当前工作目录
dir	显示当前工作目录或指定目录下的文件
clc	清除命令窗口中的所有内容
clf	清除图形窗口
quit(exit)	退出 MATLAB
type test	在命令窗口中显示文件 test. m 的内容
delete test	删除文件 test. m
which test	显示 test. m 的目录
what	显示当前目录或指定目录下的 M、MAT、MEX 文件

为了便于对输入的内容进行编辑, MATLAB 提供了一些控制光标位置和进行简单编辑的常用编辑键,掌握这些命令可以在输入命令的过程中起到事半功倍的效果,命令窗口中常用操作键如表 1.1.2 所示。

表 1.1.2 命令窗口中常用操作键

操作键	含 义	操作键	含 义
↑	调用上一行	↓	调用下一行
←	光标左移一个字符	→	光标右移一个字符
home	光标置于当前行首	end	光标置于当前行尾
delete	删除光标右边的字符	backspace	删除光标左边的字符

在以上按键中,反复使用“↑”,可以调出以前键入的所有命令,进行修改、计算。

(3) 工作空间窗口(Workspace)。

工作空间窗口是用来显示当前 MATLAB 的内存中使用的所有变量的变量名、变量的大小和变量的数据结构等信息,数据结构不同的变量对应着不同的图标。

在命令窗口中,实现变量的显示、清除、储存和调出的命令如表 1.1.3 所示。

表 1.1.3 命令窗口中实现变量控制的命令

命 令	含 义
who	显示当前工作空间中的所有变量名
whos	显示当前工作空间中所有变量的变量名、变量的大小和数据类型
whos x	显示工作空间中变量 x 的大小、数据类型
disp(x)	显示变量 x 的内容
clear	清除工作空间中的所有变量
clear x	清除工作空间中的变量 x
save 文件名	把工作空间中的变量保存在当前 MATLAB 目录下产生的一个扩展名为 mat 的文件中
load 文件名	把该 mat 文件中的变量调入到 MATLAB 的内存中

(4) 历史命令窗口(Command History)。

历史命令窗口是用来显示所有执行过的命令。在默认设置下,该窗口会保留自 MATLAB 安装后使用过的所有命令,并表明使用的时间。利用此窗口,一方面可以查看曾经执行过的命令;另一方面,可以重复利用原来输入的命令,只需在命令历史窗口中直接双击某个命令,就可以执行该命令。

(5) 当前目录窗口(Current Directory)。

当前目录窗口是用来显示当前目录下所有文件的文件名、文件类型和最后修改时间。

2. MATLAB 帮助系统

MATLAB 为用户提供了非常完善的帮助系统,例如在线帮助、帮助窗口以及 MATLAB 演示等。通过使用帮助菜单或在命令窗口中输入帮助命令,可以很容易地获得 MATLAB 的帮助信息,进一步学习 MATLAB。

1) 命令窗口查询帮助系统

命令窗口查询帮助系统中最常用的命令是 help。通过 help 命令,可以在命令窗口获

得在线帮助。调用格式如下:

help % 在命令窗口中列出所有主要的帮助主题

help / % 在命令窗口中列出所有的运算符和特殊字符

在命令窗口输入“help (函数名)”,这在命令窗口中会列出该函数 M 文件的描述及用法,这是 MATLAB 中最常用的获取帮助信息的方式,例如

```
> > help sqrt
```

```
SQRT     Square root.
```

```
SQRT(X) is the square root of the elements of X. Complex results are produced if  
X is not positive.
```

```
See also sqrtm.
```

```
Overloaded functions or methods (ones with the same name in other directories)
```

```
help sym/sqrt.m
```

```
Reference page in Help browser
```

```
doc sqrt
```

2) 联机帮助系统

单击 MATLAB 操作界面窗口的“?”按钮或选定 Help 菜单的前 4 项中的任意一项或在命令窗口中执行 helpwin、helpdesk 或 doc 命令都可以运行帮助窗口,进入 MATLAB 的联机帮助系统。

帮助向导页面包含 4 个选项卡,分别是帮助主题(Contents)、帮助索引(Index)、查询帮助(Search)以及演示帮助(Demos)。如果知道需要查询内容的关键字,一般可以选择 Index 或 Search 模式来查询;如果只知道需要查询的内容所属的主题或只是想进一步了解和学习的某一主题,一般可以选择 Contents 或 Demos 模式来查询。

3) 联机演示系统

选择 MATLAB 操作界面窗口菜单“Help→Demos”选项或在命令窗口输入 demos 或直接在帮助页面上选择 Demos 选项卡都可以进入联机演示系统。通过联机演示系统,用户可以直观、快速地学习 MATLAB 某个工具箱的使用方法,它是有关参考书籍所不能替代的。

1.1.3 MATLAB 数值运算

1. 变量

变量是任何程序设计语言的基本要素之一,MATLAB 语言当然也不例外。与一般常规的程序设计语言不同的是,MATLAB 语言并不要求对所使用的变量进行事先声明,也不需要指定变量类型,它会自动根据赋予变量的值或对变量进行的操作来确定变量的类型并为其分配内存空间。在赋值过程中,如果变量已存在,MATLAB 将使用新值代替旧值,并以新的变量类型代替旧的变量类型。

MATLAB 中变量的命名规则是:

(1) 变量名区分字母的大小写;

(2) 变量名的长度不超过 63 位,第 63 个字符之后的字符将被忽略;

(3) 变量名必须以字母开头,之后可以是任意字母、数字或下划线,变量名中不允许使用空格和标点符号。

MATLAB 中有一些预定义的变量,这些特殊的变量称为常量,如表 1.1.4 所示。

表 1.1.4 MATLAB 中的常量

常量名	常量值	常量名	常量值
i, j	虚数单位	realmin	最小可用正实数
pi	圆周率	realmax	最大可用正实数
eps	计算机的最小浮点数	inf	正无穷大,如 1/0
NaN	Not - a - Number,非数,特指 0/0	flops	浮点运算数

在 MATLAB 语言中,定义变量时应避免与常量名相同,以免改变常量的值。

与其他程序设计语言相同,MATLAB 语言中也存在变量作用域的问题。在未特殊说明的情况下,MATLAB 语言将所识别的一切变量视为局部变量,即仅在其调用的函数内有效。若要定义全局变量,应对变量进行声明,即在该变量前加关键字 global。

2. 数据运算

数学运算符: + 加法运算; - 减法运算; * 乘法运算; . * 点乘运算; / 右除运算; \ 左除运算; ./ 点右除运算; . \ 点左除运算; ^ 乘幂运算。

MATLAB 中标点符号的含义是:

(1) 在命令窗口中输入一个 MATLAB 语句(语句的一般形式为:变量 = 表达式),如果语句后为逗号或无标点符号,则在命令窗口中显示该语句的计算结果;如果语句后为分号,MATLAB 只进行计算,不在命令窗口中显示计算结果。如果要查看计算结果,只需要在命令窗口中输入变量名按回车键或打开工作空间双击选中的变量即可。

(2) 在 MATLAB 的命令窗口中输入一个表达式或利用 MATLAB 进行编程时,如果表达式太长,可以用续行符号“...”将其延续到下一行。

(3) 编写 MATLAB 程序时,通常利用符号“%”对程序或其中的语句进行注释。

MATLAB 中常用的数学函数如表 1.1.5 所示。

表 1.1.5 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	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
image(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

3. 向量运算

1) 向量生成

向量包括行向量和列向量。在 MATLAB 中,向量是这么表示的: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。

调用格式: $x = a:b:c$, 这里生成的向量 x 是以 a 为初值, c 为终值, b 为公差 of 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 1.1.1:

```
> > x = 0:0.5:2.5
```

```
x = 0    0.5000    1.0000    1.5000    2.0000    2.5000
```

(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 个的等差数列构成的行向量。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 1.1.2:

```
> > x = linspace(0, 5, 8)
```

```
x = 0    0.7143    1.4286    2.1429    2.8571    3.5714    4.2857    5.0000
```

(3) 函数 logspace。

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

该格式的功能是生成初值为 $10^{\text{first_value}}$, 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。

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。向量间的乘除运算中, 点乘“ $\cdot *$ ”、点左除“ $\cdot \backslash$ ”, 参与运算的向量必须具有相同的维数, 点乘或者点除为向量对应的元素相乘或相除; 乘“ $*$ ”、除“ $\backslash$ ”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“ $\cdot ^{\wedge}$ ”, 为元素对元素的幂运算。

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)。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`。

4. 数组运算

1) 数组的建立

(1) 直接输入数组。

建立数组最直接的方法是在命令窗口中直接输入数组。数组元素需要用方括号“ $[$ ”括起来, 元素之间可以用空格、逗号或分号分隔。需要注意的是, 用空格和逗号分隔建立行数组, 元素之间全部用分号分隔建立列数组。

(2) 利用冒号表达式建立数组。

冒号表达式建立等差数组, 它的基本形式为 $x = x1:\text{step}:x2$, 其中 $x1$ 、 step 、 $x2$ 分别为:

x_1 表示数组的首元素数值, $step$ 表示步长, 即从第二个元素开始, 后一个元素与前一个元素之间的差值, x_2 表示数组尾元素数值。注意: x_2 并非尾元素数值, 当 $x_2 - x_1$ 为 $step$ 的整数倍时, x_2 才是尾元素数值。

2) 数组元素的调用

(1) 调用数组的一个元素: 可以通过下标调用, 如 $x(i)$ 表示数组 x 的第 i 个元素。

(2) 调用数组的部分元素: $x(a:b:c)$ 表示调用数组 x 的从第 a 个元素开始, 以步长为 b 到第 c 个元素, b 可以为负数, b 缺省时为 1。

(3) 直接使用元素序号调用数组元素: $x([a\ b\ c\ d])$ 表示调用数组 x 的第 a 、 b 、 c 、 d 个元素构成一个新数组 $[x(a)\ x(b)\ x(c)\ x(d)]$ 。

3) 数组的运算

(1) 数组对标量的加、减、乘、除、乘方是数组的每个元素和该标量进行相应的加、减、乘、除、乘方运算。

(2) 两个相同维数的数组进行加、减、乘、除、幂运算, 可按元素对元素的方式进行, 不同大小或维数的数组不能进行运算。

(3) 两个相同维数的数组的点积由 `dot` 函数实现, 调用格式: `dot(a,b)`。

(4) 两个三维数组之间的向量积由 `cross` 函数实现, 调用格式: `cross(a,b)`。其中 a, b 必须是三个元素的向量。

5. 矩阵运算

由于 MATLAB 的数值计算功能都是以(复)矩阵为基本单元进行的, 因此, MATLAB 中矩阵的运算可谓最全面、最强大。

1) 矩阵的建立

(1) 直接输入小矩阵。

直接输入矩阵是最方便、最常用和最好的建立数值矩阵的方法, 尤其适合较小的简单矩阵。用此方法建立矩阵时, 应当注意以下几点:

① 输入矩阵以“`[ ]`”为其标识, 即矩阵的元素应在“`[ ]`”的内部, 此时 MATLAB 才将其识别为矩阵, 如: $a = [1, 2, 3; 1, 1, 1; 4, 5, 6]$;

② 矩阵的同行元素之间可由空格或逗号分隔, 行与行之间用分号或回车符分隔;

③ 矩阵大小可不预先定义;

④ 若不想获得中间结果, 在“`[ ]`”后可用分号结束;

⑤ 无任何元素的空矩阵也合法;

⑥ 矩阵元素可以为运算表达式, 如 $b = [\sin(\pi/3), \cos(\pi/4); \log(9), \tanh(6)]$ 。

(2) 当矩阵很大, 不适合在命令窗口直接输入时, 可以使用 MATLAB 提供的矩阵编辑器来完成矩阵的输入和修改。在使用矩阵编辑器时, 必须首先在命令窗口中预先定义一个变量, 这个变量可以是数或简单的矩阵。例如在命令窗口中输入 $A=1$, 打开工作空间窗口, 选中变量 A 双击, 就可以打开矩阵 A 的编辑器, 通过添加或修改原来的元素, 从而建立起我们需要的矩阵。

(3) 通过 M 文件建立大矩阵。

当矩阵的规模比较大, 直接输入法就显得笨拙, 出现差错也不易修改。为了解决此问题, 可以通过 M 文件输入矩阵。M 文件是一种可以在 MATLAB 环境中运行的文本文件, 分