

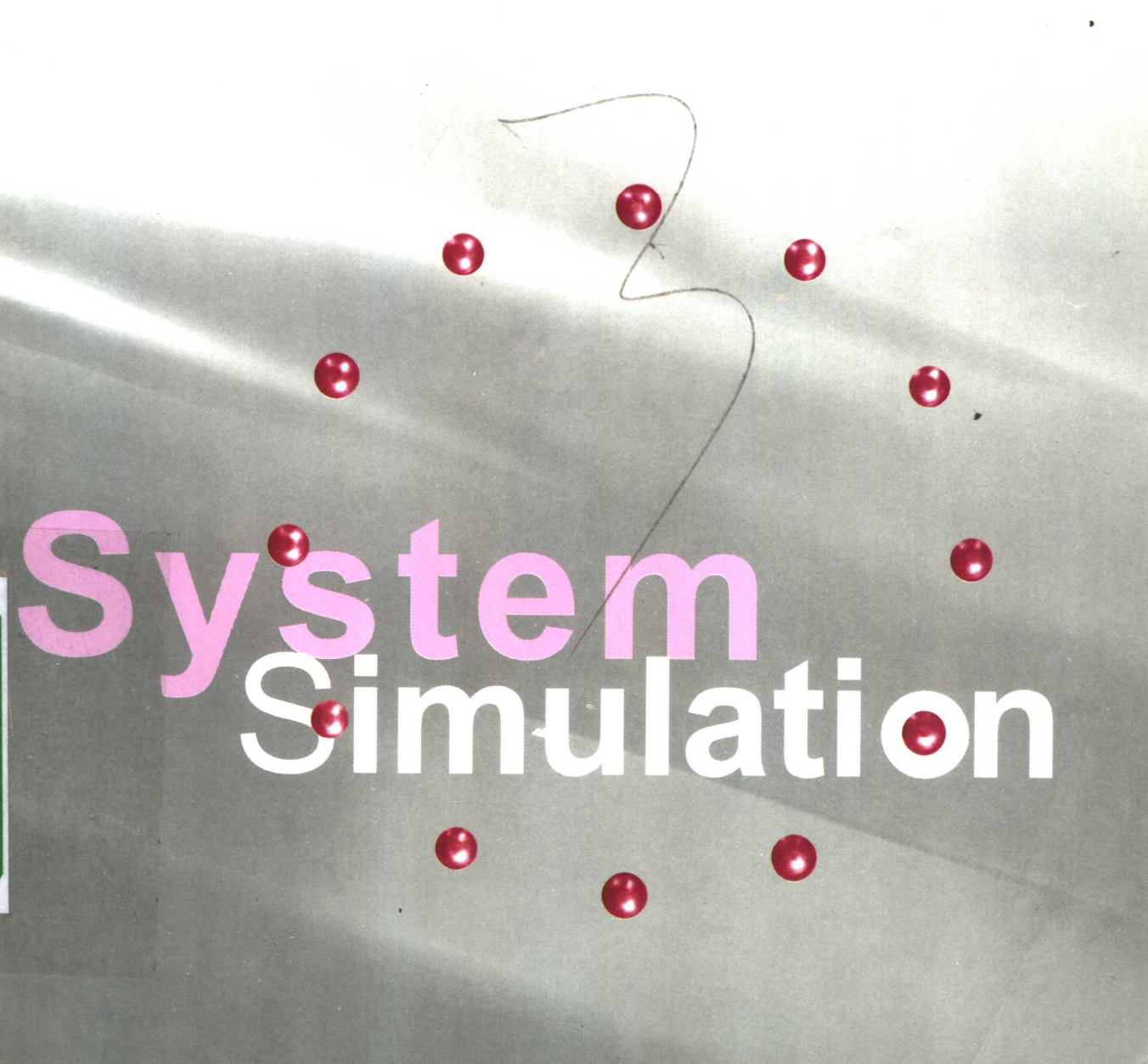
高等工科院校控制类课程系列化教材

MATLAB语言与控制系统仿真

孙 亮 主编

(修订版)

北京工业大学出版社

The background of the lower half of the cover is a light gray with a subtle, wavy, metallic texture. A thin, dark, wavy line, resembling a stylized '3' or a signal trace, winds across the center. Scattered around this line and throughout the lower half are approximately 12 small, glossy red spheres, some of which appear to be resting on the surface.

System
Simulation

TP391.9/31-2

2006

高等工科院校控制类课程系列化教材

MATLAB 语言与控制系统仿真

(修 订 版)

孙 亮 主编

北京工业大学出版社

内 容 提 要

本书主要介绍 MATLAB 语言的基本使用方法,其中包括:各种数值运算、符号运算与 MAPLE 内核、MATLAB 绘图等。在掌握 MATLAB 语言使用方法的基础上,介绍控制系统仿真的初等设计方法,其中包括:命令行控制系统仿真和 SIMULINK 结构图程序仿真设计。

本书为 MATLAB 语言入门教材,适用于信息控制类专业以及其他相关专业的本科生、大专生作为教材使用,也适用于相关工程技术人员和科研人员作为参考书使用。

图书在版编目(CIP)数据

MATLAB 语言与控制系统仿真/孙亮主编. —北京:北京工业大学出版社,2006.1 修订
ISBN 7-5639-0964-8

I . M . . . II . 孙 . . . III . 系统仿真-应用软件, MATLAB IV . TP391.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 03996 号

高等工科院校控制类课程系列化教材 MATLAB 语言与控制系统仿真

孙 亮 主 编

*

北京工业大学出版社出版发行

邮编: 100022 电话: (010)67392308

各地新华书店经销

徐水宏远印刷厂印刷

*

2006 年 1 月第 2 版 2006 年 1 月第 1 次印刷

787mm × 1092mm 16 开本 21.5 印张 537 千字

印数: 1~3000 册

ISBN 7-5639-0964-8/T · 174

定价: 30.00 元

修订版前言

本书是根据控制类专业课程的语言工具需要与实验课程要求编写的。

本书第1版于2001年3月出版,它基于MATLAB 4.2版编写而成。由于MATLAB语言的更新速度很快,现在流行的版本为MATLAB 6.0及以上各种版本。在当前流行版本中,无论是工具箱还是应用函数,以及接口系统等,都做了许多扩展与改进。

本书出版以来受到学生的广泛欢迎。使用MATLAB语言作为仿真工具具有先进性。在实验教学改革的实践应用中,MATLAB语言的使用与传统的实验教学方式相比,更是起到了不可替代的作用。

基于上述原因,为了适应仿真技术的发展和教学改革的需要,特对本书做了较全面的修订。

在本修订版中,基于本书的编写目的及使用对象的需求层次,主要章节内容基本不变,将原来基于MATLAB 4.2版的所有叙述内容全部更新为当前流行的MATLAB 6.0及以上版本的叙述,及时跟上MATLAB语言的更新速度。

教材主要章节简介如下。

本书分为3部分。第1部分为MATLAB语言基础部分,包括第1章、第2章、第3章和第4章。第2部分为控制系统仿真研究部分,包括第5章和第6章。第3部分为仿真实验设计部分,单独一章为第7章。

在第1部分中,第1章介绍MATLAB语言系统;第2章和第3章分别介绍MATLAB的数值运算与MATLAB的符号运算;第4章重点介绍了MATLAB的绘图功能。

在第2部分中,分别介绍了控制系统仿真研究基础与MATLAB的SIMULINK仿真环境。第5章主要内容有仿真研究的基本原理、控制系统的数学模型、控制系统分析以及控制系统综合等。第6章重点介绍图形界面仿真工具——SIMULINK的应用方法,主要内容有SIMULINK仿真环境、结构图程序设计、命令行系统仿真以及系统函数(S函数)设计等。

第3部分中第7章为实验设计。MATLAB语言基础部分设计了7个基本实验。经典控制理论部分设计了16个常规实验,主要使用控制系统的传递函数模型,是为配合《自动控制原理》课程的理论教学而设计的实验。线性系统理论部分设计了7个主要内容的实验,主要使用控制系统的状态空间模型,是配合线性系统理论课程的理论教学而设计的实验。本书所设计的实验都是最基本的常规实验,教学中及读者自学时可以根据课时与机时有选择地安排相应的实验。

兼顾到MATLAB语言的通用性,控制类专业的学生需要在MATLAB语言的支持下来实现控制系统的仿真,其他专业的学生只需要阅读前面4章关于MATLAB语言的通用功能即可。因此3部分内容相互独立,可满足不同层次的教学需要。

MATLAB语言基础部分的上机实验可以安排为16学时左右,控制系统仿真实验可以安

排为 16 学时(机时)左右。两大部分的非基础内容可以安排学生课外自学。

本书并未详细地介绍 MATLAB 语言,只是配合控制理论的理论教学,使用 MATLAB 语言进行控制系统仿真工作。因此,有关 MATLAB 语言更详细的内容以及 MATLAB 语言的发展历史、与其他工具软件的性能比较、MATLAB 语言的发展现状等问题,读者可以参阅其他有关书籍与文献。

本修订版由孙亮教授主编,参与本次修订工作的还有北京工业大学电子信息与控制工程学院的阮晓刚、于建均、赵晓华、陈梅莲等几位老师,其中陈梅莲老师校核了全部实验程序,阮晓刚教授审阅了全书。

本书是北京市高等学校教育教学改革立项研究成果,由北京工业大学教材出版基金资助出版。

对本书编写中的不足之处,恳请专家同仁与广大读者批评指正。

编 者

第 1 版 前 言

本书是根据“面向 21 世纪地方工科院校控制类课程系列化教材”编写委员会于 1998 年 12 月在北京工业大学召开的教学改革研讨会上制定的计算机辅助教学改革方案编写的。

为了使學生能够应用先进的仿真工具,我们进行了控制类课程实验改革,采用当今广为流行的 MATLAB 语言来设计控制类课程的课程实验。本书介绍了控制系统仿真的 MATLAB 实验平台,设计了控制类课程的基础性仿真实验,共分为三部分。

第一部分为 MATLAB 语言。其中第 1 章介绍了 MATLAB 语言系统;第 2 章和第 3 章分别介绍了 MATLAB 的数值运算与 MATLAB 的符号运算;第 4 章重点介绍了 MATLAB 的绘图功能。

第二部分为控制系统仿真研究。其中第 5 章介绍了仿真研究的基本原理、控制系统的数学模型、控制系统分析以及控制系统综合等;第 6 章介绍了图形界面仿真工具——SIMULINK 的应用方法,包括 SIMULINK 仿真环境、结构图程序设计、命令行系统仿真以及系统函数(S 函数)设计等。

第三部分为仿真实验设计,即第 7 章。其中 MATLAB 语言基础部分设计了 7 个基本实验;经典控制理论部分设计了 17 个常规实验;线性系统理论部分设计了 7 个实验。所设计的实验都是最基本的常规实验,可以根据课时与机时有选择地安排相应的实验。

兼顾到 MATLAB 语言的通用性,控制类专业的学生需要在 MATLAB 语言的支持下实现控制系统的仿真,其他专业的学生只需要阅读前面 4 章关于 MATLAB 语言的通用功能即可,因此三部分内容相互独立,满足不同层次的教学需要。

MATLAB 语言基础部分的教学(包含上机实验)约 32 学时,控制系统仿真实验课程约 20 学时(机时)。两大部分的非基础内容可以安排学生课外自学。

本书着眼于使用 MATLAB 语言进行控制系统仿真工作。因此,关于 MATLAB 语言的发展历史,与其他工具软件的性能比较,MATLAB 语言的发展现状等有关问题,读者可以参阅其他有关书籍与文献。

书中有关 MATLAB 语言的叙述是基于 MATLAB4.2 版的叙述,计算机硬件环境要求 PC486 以上的微机,操作系统要求 Windows3.0 以上的版本。有关 MATLAB 语言的详细内容与函数说明,可以在使用中查阅联机帮助,或者查阅有关 MATLAB 语言的专门书籍。

本书由孙亮副教授主编,并编写了第 1、3、4、5 章;陈梅莲老师编写了第 2 章和第 7 章,赵晓华老师编写了第 6 章。北京工业大学易继锴教授主审了全书。本书是北京市高等学校教育教学改革立项研究成果,由北京工业大学教材出版基金资助出版。

本书编写不足之处,恳请专家同仁与广大读者批评指正。

编 者

符号说明

本书为计算机语言类书籍,因此,书中大量出现计算机语言命令行输入格式、MATLAB 语言程序以及计算机屏幕显示结果。由于计算机语言表示方法中不出现斜体和希腊字母,为统一表示方法,书中的符号全部使用正体。叙述中出现的希腊字母,在程序中以英文象形字母代替,如 ω 代以 w , ζ 代以 z 等。叙述中出现的上下标变量,如 a_1 、 w_c 、 T_s 等,在程序中以 $a1$ 、 wc 、 Ts 表示。

目 录

第 1 章 MATLAB 语言系统	1
1.1 MATLAB 命令平台	2
1.2 MATLAB 语言的文件系统	3
1.2.1 MATLAB 语言的目录树	3
1.2.2 MATLAB 语言的路径搜索	4
1.3 MATLAB 语言的 m 文件与 m 函数	6
1.3.1 MATLAB 命令行操作	7
1.3.2 独立 m 文件	8
1.3.3 m 函数	9
1.4 Toolbox 工具箱	10
1.5 MATLAB 语言的帮助系统	10
1.6 MATLAB 语言的主包指令集合	14
第 2 章 MATLAB 语言的数值运算	16
2.1 基本语法结构	16
2.1.1 变量与赋值语句	17
2.1.2 函数语句	18
2.1.3 结构变量	19
2.1.4 变量精度	21
2.1.5 永久变量	22
2.2 矩阵运算	23
2.2.1 矩阵变量赋值方法	23
2.2.2 矩阵常规运算	26
2.2.3 矩阵特征运算	28
2.2.4 矩阵分解运算	28
2.3 基本数学函数	30
2.4 点运算	32
2.5 逻辑关系运算	34
2.6 多项式运算	36
2.7 线性代数方程组	37
2.8 统计分析	39
2.8.1 基本统计分析	39
2.8.2 相关分析	40

2.9	函数插值运算	42
2.10	函数优化	44
2.10.1	基本优化问题	45
2.10.2	约束优化问题	47
2.10.3	线性规划与二次型规划	49
2.11	数值求解方法	52
2.11.1	数值积分	52
2.11.2	数值微分	53
2.11.3	微分方程数值求解	54
2.11.4	非线性方程组数值求解	55
第3章	MATLAB 语言的符号运算	57
3.1	基本符号运算	57
3.1.1	符号变量定义与基本运算	57
3.1.2	符号运算工具箱	59
3.1.3	符号运算	61
3.1.4	符号矩阵运算	63
3.1.5	函数计算器的调用	64
3.2	符号运算的扩展	65
3.2.1	MAPLE 内核访问函数	65
3.2.2	MAPLE 检索系统	69
3.3	符号运算应用于控制理论计算	73
3.3.1	积分变换与反变换	73
3.3.2	微分方程求解	74
3.3.3	状态方程求解	76
3.3.4	差分方程求解	77
3.3.5	约当标准型	78
第4章	MATLAB 语言的绘图	80
4.1	标准图形表现方法	80
4.1.1	MATLAB 基本绘图	80
4.1.2	三维绘图	83
4.1.3	MATLAB 语言的多种绘图	88
4.1.4	图形注释	91
4.1.5	图形颜色修饰	92
4.1.6	图形表现修饰	96
4.1.7	图形编辑	100
4.2	控制系统仿真绘图	104
4.2.1	时间响应绘图	104
4.2.2	频率特性绘图	107
4.2.3	根轨迹图	110

4.3	句柄绘图基础	111
4.3.1	图形对象与句柄	111
4.3.2	对象属性	118
4.3.3	句柄绘图程序设计举例	122
第 5 章	控制系统仿真研究	127
5.1	控制系统仿真的基本原理	127
5.1.1	数字仿真概述	128
5.1.2	数字仿真算法简介	128
5.2	控制系统的数学模型	131
5.2.1	控制系统的参数模型	132
5.2.2	系统模型的连接	144
5.2.3	线性系统的标准型	149
5.2.4	线性系统的结构分解	158
5.3	控制系统分析	164
5.3.1	控制系统时间响应分析	165
5.3.2	根轨迹作图与系统根轨迹分析	171
5.3.3	控制系统频率响应分析	176
5.3.4	控制系统的稳定性分析	183
5.4	控制系统综合	189
5.4.1	控制系统一般校正方法	190
5.4.2	控制系统的极点配置与状态观测器	201
5.4.3	线性二次型最优控制器	205
5.5	控制系统工具箱	209
5.5.1	演示系统	209
5.5.2	控制系统工具箱应用函数	209
5.5.3	控制系统工具箱中的 GUI 工具	210
第 6 章	SIMULINK 仿真环境	215
6.1	SIMULINK 启动与界面说明	215
6.2	SIMULINK 结构图程序设计	217
6.2.1	创建结构图文件	217
6.2.2	结构图程序设计	218
6.2.3	结构图程序说明	219
6.3	SIMULINK 仿真参数设置	220
6.3.1	输入信号的参数设置	220
6.3.2	示波器的参数设置	221
6.3.3	仿真参数设置	221
6.4	结构图控制系统仿真	223
6.4.1	仿真的启动与停止	223
6.4.2	结构图系统仿真	224

6.5	MATLAB 命令行系统仿真	230
6.5.1	命令行仿真基本格式	230
6.5.2	命令行仿真操作要点	233
6.6	系统函数(S函数)设计	238
6.6.1	S函数的格式说明	238
6.6.2	S函数的创建	239
6.6.3	S函数生成结构图	242
6.7	SIMULINK 的数据传递与交换	246
6.8	SIMULINK 仿真性能的改善	249
第7章	MATLAB 语言基础与控制系统仿真实验	251
7.1	MATLAB 语言基础实验	251
7.1.1	MATLAB 语言平台	251
7.1.2	MATLAB 语言的数值运算	254
7.1.3	MATLAB 语言的符号运算	259
7.1.4	MATLAB 语言的绘图	264
7.1.5	MATLAB 语言的句柄绘图	268
7.1.6	MATLAB 语言的工具箱	271
7.1.7	m函数程序设计	273
7.2	控制原理仿真实验	275
7.2.1	控制系统的阶跃响应	275
7.2.2	控制系统的脉冲响应	278
7.2.3	控制系统的根轨迹作图	280
7.2.4	控制系统的博德图	283
7.2.5	控制系统的极坐标图	286
7.2.6	系统校正设计:频率法超前校正	287
7.2.7	系统校正设计:频率法滞后校正	290
7.2.8	系统校正设计:根轨迹法超前校正	292
7.2.9	系统校正设计:根轨迹法滞后校正	293
7.2.10	系统校正设计:频率法二阶参考模型校正	295
7.2.11	系统校正设计:频率法四阶参考模型校正	296
7.2.12	系统校正设计:速度反馈校正	297
7.2.13	系统校正设计:频率法并联校正	298
7.2.14	相平面作图	300
7.2.15	继电型非线性控制系统分析	303
7.2.16	采样控制系统分析	304
7.3	线性系统理论仿真实验	305
7.3.1	线性系统的数学模型	305
7.3.2	线性系统的标准型	309
7.3.3	能控性、能观测性与其标准型	312

7.3.4 线性系统的运动分析	315
7.3.5 线性系统的结构分析	317
7.3.6 状态反馈与状态观测器	319
7.3.7 线性二次型最优控制器设计	321
附录:控制系统工具箱函数清单	323
参考文献	327

MATLAB 语言系统

MATLAB 语言是由美国 Clever Moler 博士于 1980 年开发的,在 MathWork 公司及许多专家的努力下,经多次扩充修改,现已发行到 MATLAB 6. X 以上版本,成为流行全球、深受用户欢迎的计算机辅助设计软件工具。

MATLAB 语言设计者最早是为了解决数学中“线性代数”课程的矩阵运算问题而进行 MATLAB 语言开发的。之后,控制学科的专家学者们注意到了它丰富的矩阵处理功能,开发了用于控制理论研究的专用工具箱(toolbox \ control \)和结构图程序设计的 SIMULINK 仿真环境(toolbox \ simulink \),使得 MATLAB 语言成为控制界计算机辅助设计的有利工具。之后又相继开发了各种应用工具,如信号处理工具箱(toolbox \ signal \)、优化计算工具箱(toolbox \ optim \)、符号运算工具箱(toolbox \ symbolic \)等,以及许多相关应用学科的各种专用工具箱,使得 MATLAB 语言越来越趋于完善与实用。例如在信息与控制学科中相当活跃的模糊逻辑、小波分析、人工神经网络技术、系统模型辨识技术等,在 MATLAB 语言中都有专用的工具箱。可以说,迄今为止,MATLAB 语言的扩展开发还远远没有结束,各学科的相互促进、相互渗透会使得 MATLAB 语言的应用越来越广泛,使用越来越方便。

MATLAB 语言的主要特点如下。

- 矩阵运算功能(MATRICES)
- 符号运算功能(SYMBOLIC)
- 高级与低级兼备的图形功能(FIGURE)
- 图形化控制仿真程序设计功能(SIMULINK)
- 可靠的容错功能(ERROR COMPATIBILITY)
- 兼容与接口功能(INTERFACE)
- 联机检索功能(INFORMATION)

MATLAB 语言是一种基本不依赖于硬件机型的软件系统,可以在几乎所有硬件系统机上运行。在数值运算中,运算的可靠性与数值的稳定性要高于其他高级语言。另外,就 MATLAB 语言在计算机语言中的地位而言,其丰富的、独具特色的指令集显示出它是一种地位高于 C 语言的语言工具,就好比 C 语言是高于汇编语言的语言工具一样。因此,许多在 C 语言中或者其他高级语言中很复杂的编程问题在 MATLAB 语言编程中,只需要一条专用指令就可以完成了。例如数值积分中的龙格-库塔算法,在 MATLAB 语言中,只需要一条专用指令 rk23 或者 rk45 就可以完成。再如求取传递函数的零点、极点,用 C 语言编程是比较麻烦的,但是在 MATLAB 语言中,只需要一条指令 tf2zp 即可求出。

与其他计算机语言相比,在 MATLAB 语言诸多优点中,脱离概念而转向应用是其最显著

的优点,许多 MATLAB 命令都是以应用为目的而设计开发出来的,这使学习者感到十分简便易学。它使得面向对象的计算机程序设计思想由抽象化转为具体化、实际化,而再也不是除了计算机程序员之外,大家都感到望而生畏、入门不易的计算机语言了。SIMULINK、句柄绘图以及符号运算等功能,处处体现了 MATLAB 语言的实用性与开放性。

继 MATLAB 3.0(DOS 界面)版本之后,在短短几年内,MathWorks 公司又逐年推出了 4.0 版、5.0 版等,迄今流行版本为 6.0 以上版本,6.1、6.2、……、6.5 等版本。MathWorks 公司除了广泛提供简便易学的学生版本之外,工程应用版本使得 MATLAB 语言在各领域中获得了充分的肯定并得到广泛的应用。

1.1 MATLAB 命令平台

在 Windows 界面上双击 MATLAB 图标,或者执行应用程序

c:\matlab\bin\matlab.exe

即可打开 MATLAB 命令平台,如图 1.1 所示。

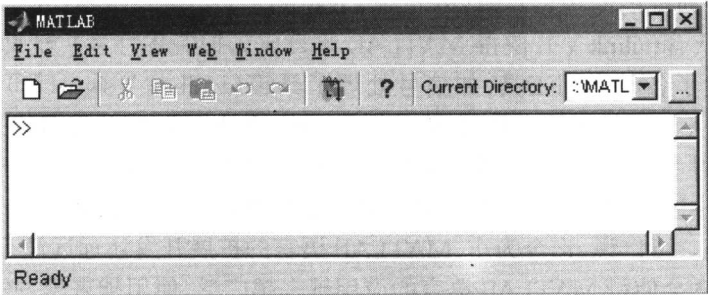


图 1.1 MATLAB 命令平台

与 Windows 的窗口界面类似,MATLAB 命令平台有菜单项 File、Edit、View、Web、Window、Help 等项可以选择。MATLAB 的文件操作菜单界面如图 1.2 所示。

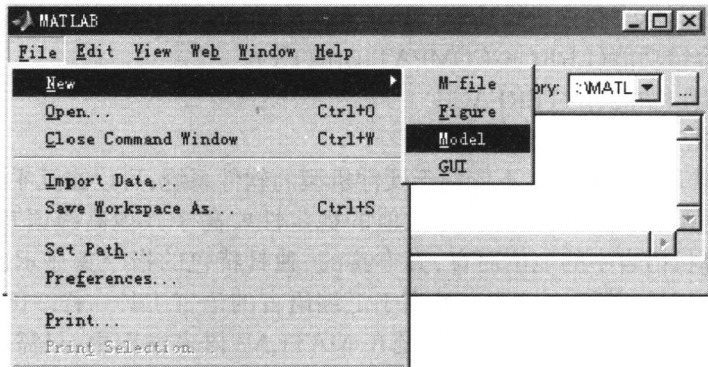


图 1.2 MATLAB 的文件操作菜单

菜单项 File 的功能为

New

建立新文件

<u>O</u> pen...	打开文件
<u>C</u> lose Command Window	关闭命令窗口
<u>I</u> mport Data...	装入数据
Save <u>W</u> orkspace As...	将工作区另存为
S <u>e</u> t Path...	设定路径
<u>P</u> rint...	打印
.....	

由于各菜单项的选择与执行方法与 Windows 风格完全相同,这里就不一一说明了。

1.2 MATLAB 语言的文件系统

1.2.1 MATLAB 语言的目录树

目录树结构如图 1.3 所示。

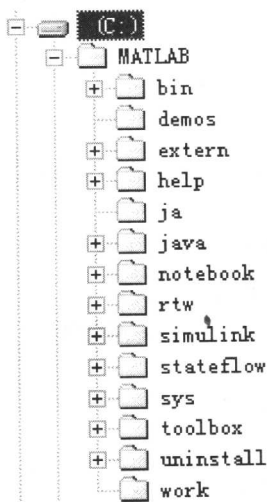


图 1.3 MATLAB 语言的目录树

各子目录内容说明:

matlab \ bin \

MATLAB 语言的系统文件、帮助文件、cmex 与 fmex 批处理文件以及其他一些必要的二进制文件。

matlab \ demos \

MATLAB 语言的演示系统文件。

matlab \ extern \

MATLAB 语言与 C 语言、FORTRAN 语言之间的交互工具,其中包括函数定义与链接库。下属的 4 个子目录分别为

examples \

各种示例文件

include \	C 语言使用的头文件(*.h 文件)
lib \	外部接口的目标链接库
src \	C 语言与 FORTRAN 语言的一些源程序

matlab \ help \

MATLAB 语言的帮助系统文件。

matlab \ java \

MATLAB 语言与 java 语言的接口程序等。

matlab \ notebook \

MATLAB 语言与 microsoft word 之间的交互程序。

matlab \ rtw \

MATLAB 语言与 windows 之间的实时交互工具文件。

matlab \ simulink \

SIMULINK 下的 mex 文件的函数定义与接口文件。

matlab \ stateflow \

STATEFLOW 状态流工具文件。

matlab \ sys \

MATLAB 语言的系统文件库。

matlab \ toolbox \

MATLAB 语言的工具箱。MATLAB 语言的各种应用函数都放在该目录之下,下属子目

录有

control \	控制系统仿真工具箱
ident \	系统辨识工具箱
matlab \	MATLAB 主包函数库
.....	
signal \	信号处理工具箱
symbolic \	符号运算工具箱
unitools \	图形界面工具箱

matlab \ uninstall \

安装后,清除 MATLAB 语言的子目录文件。

matlab \ work \

默认的用户工作目录。

在 MATLAB 的基础子目录中,初级用户经常用到的有 work(工作目录)、toolbox(工具箱目录)、help(帮助系统目录)等。

1.2.2 MATLAB 语言的路径搜索

1. 搜索顺序

MATLAB 默认的当前工作目录为

c: \ matlab \ work \

因此,MATLAB 在执行一条命令或者一个函数(内部函数、外部函数、自定义函数等)时,需要

找到函数的位置,这是由 MATLAB 的路径搜索功能来实现的。MATLAB 在搜索某一个变量或者某一个函数时,其搜索顺序为

- ①搜索工作内存,是否是变量;
- ②检查是否是内部函数;
- ③搜索当前目录,是否是 .m 文件;
- ④逐项查阅 matlabpath 所定义的路径。

2. 默认路径搜索

默认搜索路径由内部函数 matlabpath 所定义。键入 matlabpath,得到的搜索路径清单为

```
c: \ matlab \ toolbox \ matlab \ general
c: \ matlab \ toolbox \ matlab \ ops
c: \ matlab \ toolbox \ matlab \ lang
.....
c: \ matlab \ toolbox \ control \ control
.....
c: \ matlab \ work
```

3. 路径函数搜索

路径函数为 path,使用路径函数可以实现路径搜索顺序列表、获得路径、修改以及增添搜索路径等。如

```
path(path,'c: \ user')
```

可以将用户子目录扩充至搜索路径之中。例如,在扩充搜索之前执行命令

```
p = path
```

显示结果为

```
p =
c: \ matlab \ toolbox \ matlab \ general
.....
```

即 matlabpath 定义的路径。执行路径扩充命令

```
path(path,'c: \ user')
```

后,再执行命令

```
p = path
```

显示结果则改变为

```
p =
c: \ matlab \ toolbox \ matlab \ general
.....
c: \ user
```

从而将用户目录扩充至搜索目录之中。

注意:利用 path 命令所作的扩充定义,在关闭 MATLAB 后即丢失,再次启动时不予识别。

4. 路径搜索工具窗口

可以利用路径搜索工具实现搜索路径的设置修改。键入

```
pathtool
```