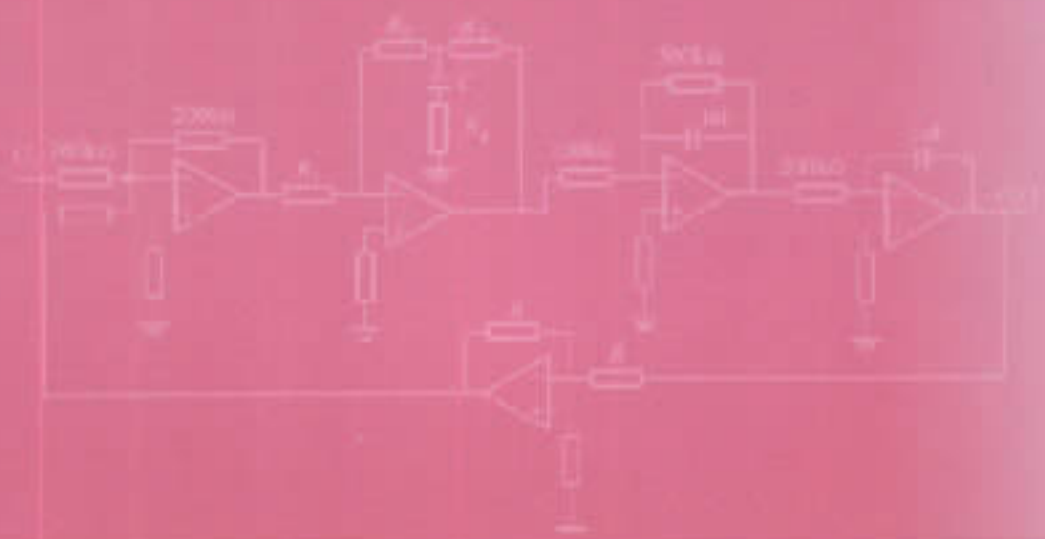
自动化专业系列教材

自动控制理论实验与仿真

ZIDONG KONGZHI LILUN SHIYAN YU FANGZHEN

主　编　王晓燕　冯　江
副主编　任会萱　卢帆兴
主　审　胡寿松



华南理工大学出版社

自动化专业系列教材

自 动 控 制 理 论
实 验 与 仿 真

主　编　王晓燕　冯　江

副主编　任金霞　卢帆兴

主　审　胡修林

华南理工大学出版社

·广州·

图书在版编目（CIP）数据

自动控制理论实验与仿真/王晓燕，冯　江主编．—广州：华南理工大学出版社，2006.9

（自动化专业系列教材）

ISBN 7-5623-2465-4

Ⅰ.**自…**　Ⅱ.①**王…** ②**冯…**　Ⅲ.**自动控制理论-高等学校-教材**　Ⅳ.TP13

中国版本图书馆 CIP **数据核字（**2006**）第** 092855 **号**

总 发 行：华南理工大学出版社（广州五山华南理工大学 17 **号楼，邮编** 510640**）**

营销部电话：020－87113487　87111048 **（传真）**

E-mail：scutc13@scut.edu.cn　　http：//www.scutpress.com.cn

责任编辑：詹志青

印 刷 者：

开　　本：787×1092　1/16　**印张：**11.125　**字数：**270 **千**

版　　次：2006 **年** 9 **月第** 1 **版第** 1 **次印刷**

印　　数：1～3000 **册**

定　　价：18.50 **元**

版权所有　盗版必究

前　言

“自动控制理论”是自动控制、工业自动化、电气、仪表及测控、电子信息、通信、机械、动力、冶金等专业的一门重要技术理论基础课程，也是一门专业性、实践性很强的课程。如何开展好工科院校学生“自动控制理论”课程的实验指导工作，是诸多任课教师及专家共同关注的问题，也对学生理解掌握自动控制理论起着至关重要的作用。

自动控制理论实验的主要任务是使学生通过实验进一步理解和掌握自动控制理论的基本概念、基本原理和控制系统的分析与设计方法。在课时压缩、教学要求提高的条件下，许多教师和学生都迫切希望拥有一本与教材相配套的理论性强、实践性强、操作性强的实验指导书。按照加强理论、巩固基础、培养学生的动手能力、观察思考能力和创新能力的指导思想，结合各相关专业的不同教学要求，以及各校的不同实验设备等教学条件，并结合编者多年从事控制理论课程教学及实验指导的经验和体会，特编写本书，以方便教学和实验，并满足业余爱好者课后实践的需要。希望对读者学习和掌握自动控制理论有所帮助，并起到抛砖引玉的效果。

本书尽量避开传统控制实验对专用实验设备和实验场地的依赖，从分立电子元件以及现代计算机技术应用的角度，精心设计了近 30 个相应的控制理论实验。每个实验都尽量提供了“分立元件电路模拟”和“计算机软件仿真”等多种实现方法，详细阐述了其实验原理，并给出了相应的实验内容、要求与思考；但一般不限制具体的实验步骤，以方便师生根据本校的实际条件灵活地选择实验方法，同时满足读者的业余兴趣。这些实验大多针对主教材中的理论阐述或例题，运用实验的方法加以实现。

通过对本书的学习，读者可以加强学以致用的综合能力，提高对控制理论的理解与应用能力，达到理论与实践的统一。书中仿真程序全部在 Matlab 7.0 环境下测试通过，学生可直接按照本书进行实验操作，也可以根据本书所揭示的多种实验方法和技巧自己设计实验。本书的主教材可以选用胡寿松教授主编的《自动控制原理》，也可以选用其他所有版本的控制理论教材。

本书由江西理工大学王晓燕和冯江担任主编，任金霞和卢帆兴担任副主编，由华中科技大学博士生导师胡修林教授主审。参加编写的人员有：卢帆兴（实验 7.2 及绪论）、钟山（实验 9.1）、赵书玲（实验 9.3）、王晓燕（实验 6.1～实验 6.6、实验 7.1、8.1、8.2、9.2、9.4、9.5）、任金霞（实验 10.1、10.2 及附录）、冯江（其余章节并统稿）。还有很多领导、同事和同行指导或参与了编写纲要的讨

论，限于篇幅，不能一一列出。没有他们的热情支持和帮助，本书不可能如此顺利地和读者见面。在此，我们表示衷心的感谢和崇高的敬意！

“十年磨一剑，三年成本书。”为给读者奉献一本精品辅导教材，我们“编修千日”，字里行间无不饱浸着众多编者的一番心血。当然，由于编者水平有限，书中内容虽经仔细斟酌，仍然可能存在纰漏和不妥之处，恳请广大读者不吝赐教，以便本书的修订，更好地为读者服务。我们的联系邮箱为：Teacher.F@163.com。

编　者

2006 年 6 月于赣州八境台

目　录

绪　论　自动控制理论的任务、要求及其实现方法 …… 1
第一章　自动控制的一般概念 …… 5
实验 1.1　MATLAB 的基本操作与仿真初步 …… 5
实验 1.2　SIMULINK 的交互式仿真 …… 14
第二章　控制系统的数学模型 …… 22
实验 2.1　建立系统数学模型 …… 22
实验 2.2　典型环节的模拟电路和软件仿真 …… 26
第三章　线性系统的时域分析法 …… 32
实验 3.1　二阶系统的动态过程分析 …… 32
实验 3.2　控制系统的稳定性分析 …… 42
第四章　线性系统的根轨迹法 …… 51
实验 4.1　控制系统的根轨迹分析 …… 51
实验 4.2　控制系统的根轨迹(主导极点)法校正 …… 56
第五章　线性系统的频域分析法 …… 64
实验 5.1　控制系统的频率特性测量 …… 64
实验 5.2　系统 Bode 图及 Nyquist 曲线的绘制及其稳定性分析 …… 70
第六章　线性系统的校正方法 …… 77
实验 6.1　连续系统的频率法超前校正 …… 77
实验 6.2　连续系统的频率法滞后校正 …… 83
实验 6.3　连续系统的频率法滞后－超前校正 …… 86
实验 6.4　连续系统的串联综合法校正 …… 90
实验 6.5　连续系统的串联工程法校正 …… 97
实验 6.6　连续系统的反馈校正 …… 101
第七章　线性离散系统的分析与校正 …… 107
实验 7.1　采样控制系统分析 …… 107
实验 7.2　系统的数字 PID 控制 …… 113
第八章　非线性控制系统分析 …… 120
实验 8.1　典型非线性环节仿真 …… 120
实验 8.2　非线性系统的相平面分析 …… 126
第九章　线性系统的状态空间分析与综合 …… 133
实验 9.1　线性系统的状态空间描述 …… 133
实验 9.2　线性系统的解耦控制 …… 135
实验 9.3　线性定常系统的结构分解 …… 143
实验 9.4　状态反馈与状态观测器的设计 …… 146

实验 9.5　状态空间方程的求解与稳定性分析 …… 156
第十章　动态系统的最优控制方法…… 160
实验 10.1　线性二次型最优控制器设计 …… 160
实验 10.2　离散系统线性二次型最优控制器设计 …… 164
附　录　控制系统分析中常用的 MATLAB 命令和函数 …… 168
参考文献…… 172

绪论　自动控制理论的任务、要求及其实现方法

一、自动控制理论实验的任务

“自动控制理论”是全日制本科电类专业的重要公共理论基础课程，也是自动控制、工业自动化、电气自动化、仪表及测试、电子信息工程、通信工程、机械、动力、冶金等专业的一门主要专业技术理论基础课程。自动控制理论的实践性环节，对学生理解和掌握自动控制理论起着至关重要的直接影响作用。

自动控制理论实验的主要任务是使学生通过实验进一步理解和掌握自动控制理论的基本概念、基本原理和控制系统的分析与设计方法。它是自动控制理论课程教学的一部分，其主要目标如下：

⑴ 深刻理解自动控制的基本概念、基本理论及其物理意义。

⑵ 初步掌握控制系统的分析与设计方法。

⑶ 了解控制理论的实际应用及其发展方向。

⑷ 学习和掌握系统模拟电路的构成和测试技术。

⑸ 学习和掌握现代计算机技术及其辅助工具的运用，提高计算机的应用能力与水平。

⑹ 提高实际应用能力和动手操作能力，培养严肃认真、一丝不苟的科学态度。

二、自动控制理论实验的要求

自动控制理论实验是一个专业性、操作性很强的实践环节，要求有专门的实验场所和实验设备，并且要求参加实验者必须具备必要的相关理论基础知识，对所做实验的前提条件及制约因素有足够的认识和了解，同时要求参加实验者具备较强的动手操作能力、观察思考能力、研究分析能力和创新能力。

三、自动控制理论实验的实现方法

自动控制理论课程的实验方法比较灵活，实施方案和思路也比较多。众多厂家和高校都研制开发出了各种实验箱以及相应的实验平台，但大多受到实验场所、设备等教学条件的制约。

按照加强理论、巩固基础、培养学生的动手能力、观察思考能力和创新能力的指导思想，编者结合多年从事该课程教学及实验指导的经验和体会，编写本书时从通用实验参考方案的角度，尽量避开传统实验方法对专门实验箱及其实验平台的依赖，给出了“基于分立元件的电路模拟实验”以及“计算机软件仿真实验”等两种实现方法，使读者能够自行设计和构造实验电路，以方便教学和实验，并满足业余爱好者课后实践的需要。

㈠ 电路分立元件模拟的原理及其装置

各个电路分立元件如运算放大器、电容、电阻、二极管等都表现出不同的电气特性，如比例（幅值增益）、积分（相位滞后）、微分（相位超前）等。通过对分立元件的并联、串联等组合

应用，以及改变所组成的实验环节的参数，可以构成（模拟）控制系统的各种特性的被控对象。

自动控制原理的电路模拟实验装置一般由模拟电路、函数信号发生器、示波器、频率响应分析仪、直流稳压电源等设备组成，如图 0－1 所示。

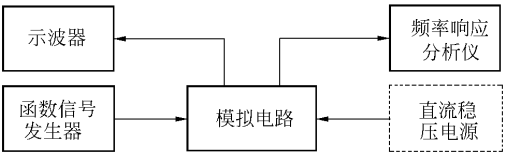


图 0－1　电路模拟实验装置的组成

⑴ 模拟电路由实验所需的运算放大器、电容、电阻、二极管等分立元件以及 ±12V 的直流稳压电源构成，起控制装置和被控对象的作用。（由于阻容元件的精度直接影响环节模拟的精度，因此，设计各种时间参数时，往往选择大电阻、小电容。）

⑵ 函数信号发生器是自动控制系统实验的输入信号产生装置。它采用微处理器控制，数字合成各种频率准确的函数波形，如正弦信号、斜坡信号、抛物线信号、阶跃信号、方波信号、脉冲信号、三角信号、锯齿信号等。各种波形的输出峰值电压、信号频率、斜坡增值、占空比等参数均在一定范围内可调。

⑶ 示波器是自动控制系统实验的输出信号显示装置，用于实验中输出响应波形的测量、观察和计算。它可以实时、清晰地观察控制系统各项静态、动态特性，准确地记录（显示）系统各种输出响应的波形、频率、幅值、相位等参数。在控制系统实验中，常用的示波器有低频慢扫描示波器、超低频双踪示波器等长余辉示波装置。

⑷ 频率响应分析仪是自动控制系统实验的可选输出信号分析装置，用于实验中输出响应波形的动态特性测试、动平衡测试、状态监测和故障诊断以及阻抗分析等。它一般采用微处理器控制，并配有相应的测试分析软件，具有相关滤波、高抗干扰、高灵敏、高测试精度、振幅和相位直观、物理意义明确、操作方便等特点，可以准确地分析系统输出响应的幅频特性和相频特性。在控制系统实验中，常用的频率响应分析仪有超低频频率特性分析仪、宽频双通道自动扫频频响分析仪等。

（二）计算机软件仿真的实验原理及其实现

传统的自动控制原理的软件仿真实验装置通常由模拟电路板、A/D－D/A 接口板、计算机（软件模拟系统）、打印机、显示器及直流稳压电源组成，如图 0－2 所示。

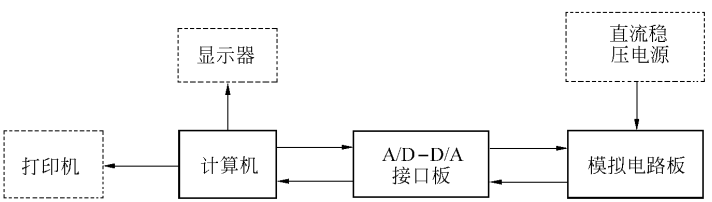


图 0－2　软件仿真实验装置的组成

⑴ 模拟电路板起控制装置和被控对象的作用，可以仿真控制系统中的不同环节。（参见“实验 2.2”。）

⑵ A/D－D/A 接口板起模拟信号与数字信号的转换作用。它一般接在计算机主板的总线扩展槽上，将软件模拟系统产生的输入信号传输给模拟电路板，同时将模拟电路产生的输出响应信号传输给计算机。A/D－D/A 接口板卡的 A/D 输入一般为 0～5V，D/A 输出一般为 －2.5～2.5V。

⑶ 计算机（软件模拟系统）根据不同的实验分别起信号（阶跃、三角、正弦等）产生与测量、显示、响应分析、系统控制及数据处理等作用，相当于图 0－1 中的函数信号发生器、示波器以及频率响应分析仪等设备，并且可以通过外接打印机等输出设备，把有关的数据及图形打印出来。

这样一套实验装置一般需要专门的计算机仿真（模拟）软件以及相应的 A/D－D/A 接口板等专门设备，受教学条件的制约较大。因此，可以考虑将“被控对象”环节的功能整合到仿真软件里面，这样就可以大大简化实验装置（只需要一套仿真软件）。

MATLAB 软件（Matrix Laboratory，矩阵实验室）就是这样的一套现成的系统。它是 Math Works 公司于 1982 年推出的一套高性能的数值计算和可视化数学软件，具有强大的矩阵计算能力和良好的图形可视化功能，为用户提供了非常直观和简洁的程序开发环境，被誉为“巨人肩上的工具”以及“第四代计算机语言”，在信号处理、图像处理、控制系统辨识、神经网络等各个学科领域都得到了广泛的应用。

特别方便的是，MATLAB 软件提供了专门的控制系统工具箱，控制系统中的许多应用（如时域分析、频域分析、根轨迹作图等）都可以用一个简单的 m 函数命令来实现。尤其是所提供的 Simulink 软件包，由于采用与传递函数动态框图非常相似的结构图模型，并采用类似于电子示波器的模块显示仿真曲线，因此特别适用于“自动控制理论”课程实验的系统仿真和分析。（有关 MATLAB 与 Simulink 的使用参见本书“实验 1.1 MATLAB 的基本操作与仿真初步”与“实验 1.2 Simulink 的交互式仿真”。）

四、对参加实验学生的要求

⑴ 认真阅读实验指导书，复习与实验有关的理论知识，明确每次实验的目的，了解实验所涉及的元件的特性以及相关软件的操作，熟悉实验的内容和方法。

⑵ 在实验前，参照实验指导书进行接线和操作，经自查和指导教师检查同意后再通电。

⑶ 在实验过程中注意仔细观察，认真记录有关数据和图像，并经由指导教师查验后才能结束实验。

⑷ 实验后应切断所有仪器和设备的电源，并整理实验平台，恢复到实验前的状况。

⑸ 爱护实验设备，遵守实验室的规章制度，服从实验指导教师和实验室管理教师的安排和管理。

五、对实验报告的要求

⑴ 标明实验名称、实验内容、实验目的，以及实验时间、实验地点、同组实验人员等。

⑵ 注明实验所用的设备、仪器以及实验的步骤和方法。特殊实验还应注明实验室的温度、湿度、噪声、电磁效应等外部实验环境。

⑶ 记录清楚实验所得的原始数据和图像，并按实验要求绘制出相关的图表、曲线，或计算相关的数据。

⑷ 认真分析所得的实验结果，得出明确的实验结论。并注明该结论所依据的原理和理论。

⑸ 对实验进行反馈回顾，总结出实验的方法要领和注意事项；或对实验失败的原因进行分析剖解，总结出实验的经验和教训。

⑹ 字迹工整，书写规范，并使用统一的实验报告纸和坐标纸。

第一章　自动控制的一般概念

实验 1.1　MATLAB 的基本操作与仿真初步

一、实验目的

⑴ 了解 MATLAB 的工作环境及其安装与运行。
⑵ 熟悉 MATLAB 的常用交互界面与常用指令及其调用格式。
⑶ 掌握 MATLAB 的基本语法以及 M 文件的建立与基本操作。
⑷ 了解控制实验中常用的 MATLAB 指令。

二、实验内容

建立并执行 M 文件 MATLAB.M，使之能够画出 $z=\dfrac{\sin\left(\sqrt{x^2+y^2}\right)}{\sqrt{x^2+y^2}}$ 所表示的三维网线曲面，如图 1.1－1 所示。x，y 的取值范围为 $[-8,8]$。

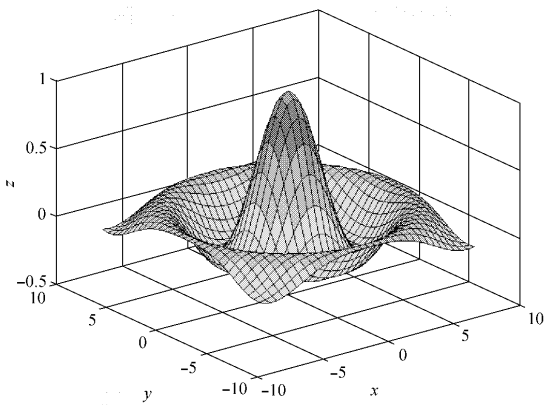


图 1.1－1　三维网线曲面

三、实验原理

⑴ MATLAB 概述

1．MATLAB 的工作环境与安装

MATLAB 可适应于许多机种和系统，如 IBM－PC、Macintosh、Unix，等等。其中对 PC 机系统的基本硬件要求为 奔腾以上处理器、16MB 以上内存、1GB 以上硬盘空间、8 位以上

彩色显示、光驱及鼠标等，目前绝大多数 PC 机的配置都能满足要求。对软件的基本要求为：Windows 9x 以上操作平台以及阅读 HTML 文件和 PDF 文件的相应软件等。

一般来说，将 MATLAB 安装光盘插入光驱后，“安装向导”会自动启动；否则可以直接执行安装光盘中的 setup.exe 文件，启动安装向导。然后按屏幕提示操作，如输入用户名称、口令、选择安装目录等。MATLAB 的默认安装目录为 C：\ Matlab \ 。若需更改，则点击提示图形界面上的 Browse 按键（如图 1.1－2 所示），然后按提示逐步进行。

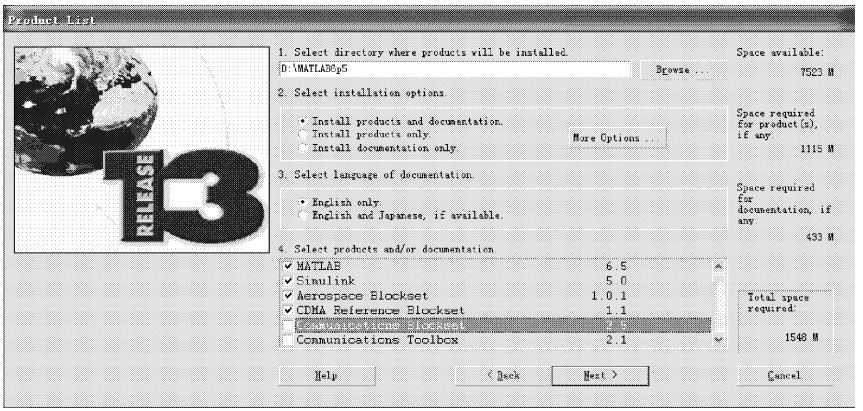


图 1.1－2　MATLAB 的安装

2．MATLAB 的运行

执行 C：\ Matlab \ bin \ Matlab.exe 程序（或双击 MATLAB 图标），即可进入 MATLAB 的工作界面窗口，如图 1.1－3 所示。

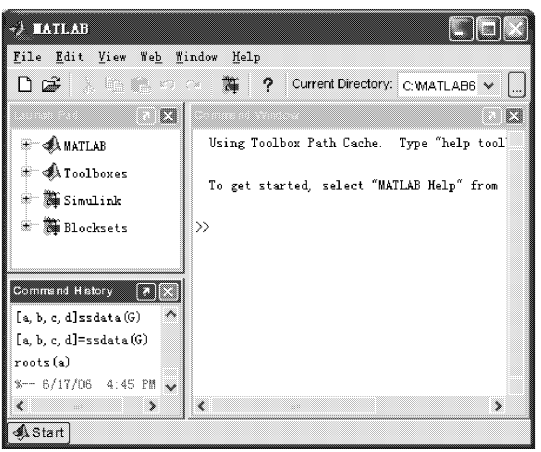


图 1.1－3　MATLAB 的工作界面窗口

在工作界面窗口中，左上方“Lauch Pad”窗口为交互界面分类目录窗，提供进入工具、演示和文件的便捷方式；左下方“Command History”窗口为指令历程窗口，用于记录和观察先前用过的函数，拷贝和执行被选择的行；右方“Command Window”窗口为指令窗口，用于输入变量、运行函数和 M 文件。

3. MATLAB 的常用交互界面

(1) MATLAB 指令窗 (Command Window) 如图 1.1－4 所示。

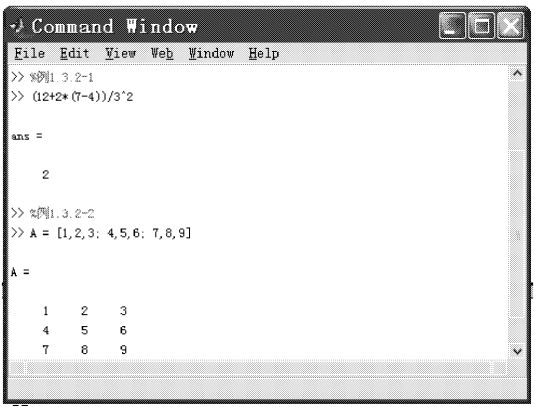


图 1.1－4　MATLAB 指令窗

(2) MATLAB 指令历程窗 (Command History) 如图 1.1－5 所示。



图 1.1－5　MATLAB 指令历程窗

(3) MATLAB 工作空间浏览窗 (Workspace) 如图 1.1－6 所示。

(4) MATLAB 交互界面分类目录窗 (Launch Pad) 如图 1.1－7 所示。

(5) MATLAB 当前目录浏览窗 (Current Directory) 如图 1.1－8 所示。

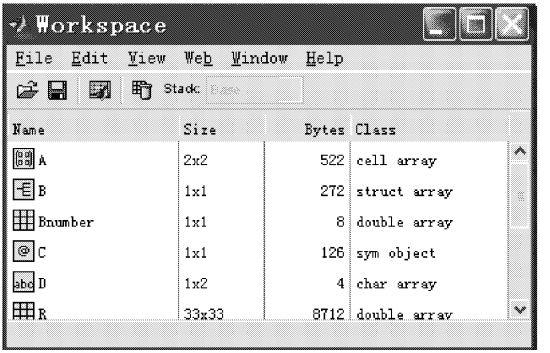


图 1.1-6　MATLAB **工作空间浏览窗**

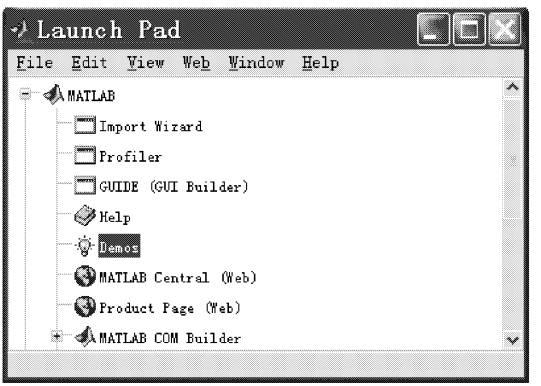


图 1.1-7　MATLAB **交互界面分类目录窗**

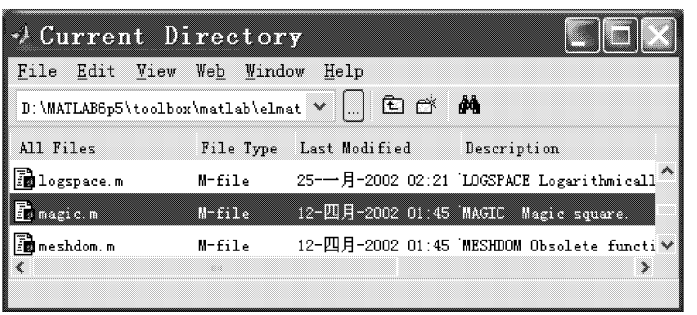


图 1.1-8　MATLAB **当前目录浏览窗**

(6) MATLAB 内存数组编辑窗 (Array Editor) 如图 1.1－9 所示。

(7) MATLAB 帮助导航/浏览窗 (Help Navigator/Browser) 如图 1.1－10 所示。

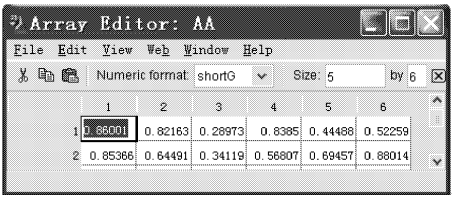


图 1.1－9　MATLAB 内存数组编辑窗

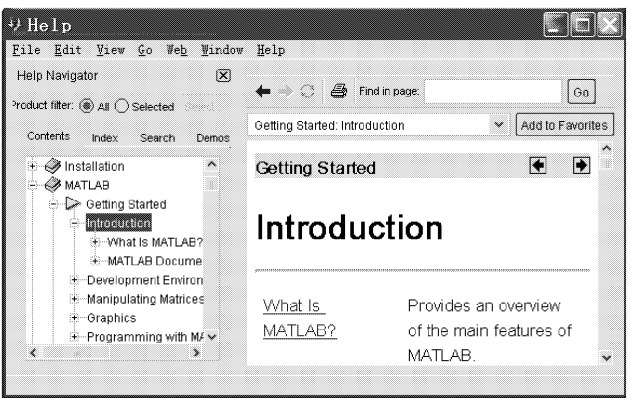


图 1.1－10　MATLAB 帮助导航/浏览窗

4. MATLAB 的指令菜单

(1)【File】——基本文件操作选项

New	打开编辑/调试器、新图形窗、Simulink 用的 MDL 文件
Open	通过已有的 M 文件打开编辑/调试器
Open Selection	打开指令窗中指定的 M 文件
Run Script	运行已有的脚本 M 文件
Load Workspace	向 MATLAB 工作空间装载 MAT 文件中的变量数据
Save Workspace As	将 MATLAB 工作空间中的所有变量存为 MAT 文件
Show Workspace	显示工作空间浏览器
Show Graphics Property Editor	显示图形对象属性编辑器
Show GUI Layout Tool	显示图形用户界面制作工具
Set Path	调用路径浏览器
Preferences	调用 MATLAB 指令窗环境设置卡
Print Setup	打印设置
Print	打印工作窗中的内容
Print Selection	打印指令窗中所选定的内容

Exit MATLAB	退出 MATLAB 程序

⑵【Edit】——编辑操作选项

Cut	剪切
Copy	复制
Paste	粘贴
Clear Session	清除指令窗里的显示内容 (但不清除工作内存中的变量)

⑶【Windows】——工作窗口管理选项

选择 MATLAB 环境下的活动工作窗口。如果没有图形,则只有一个【1. MATLAB Command Windows】选项 如果有图形,则会有相应的其他图形窗口选项。

⑷【Help】——帮助选项

Help Windows	打开分类帮助窗口
Help Tips	打开函数文件指令名帮助窗口
Help Desk	打开以 HTML 超文本形式存储的帮助文件主页
Examples and Demos	打开 MATLAB 演示窗口主页
About MATLAB	MATLAB 注册图标、版本、制造商和用户信息
Subscribe	打开 MATLAB 制造商、销售商的用户联络登记表

5. MATLAB 的指令格式

⑴ MATLAB 的默认变量

每当启动 MATLAB 时,就会自动产生一些默认的预定义变量 (predefined variable),如表 1.1-1 所示。

表 1.1-1 MATLAB 的预定义变量

预定义变量	含 义	预定义变量	含 义
ans	计算结果 (answer) 的缺省变量名	eps	机器零阈值
i 或 j	虚单元,$i=j=\sqrt{-1}$	NaN 或 nan	不是一个数 (Not a Number),如 0/0,∞/∞
pi	圆周率 π	Inf 或 inf	无穷大,如 1/0
realmax	最大正实数	realmin	最小正实数
nargin	函数输入宗量数目	nargout	函数输出宗量数目

在编写指令和程序时,应尽量不要改变表 1.1-1 所列的默认变量的赋值,以免产生混淆。否则,一旦使用 clear 指令清除 MATLAB 内存中的变量,或重新启动 MATLAB 指令窗,用户所改变的默认变量的赋值会自动重新恢复为默认值。

⑵ MATLAB 的指令表达式

MATLAB 的表达式书写规则与"数学算式"几乎完全相同,其基本运算表达式与数学算式的对应关系如表 1.1-2 所示。