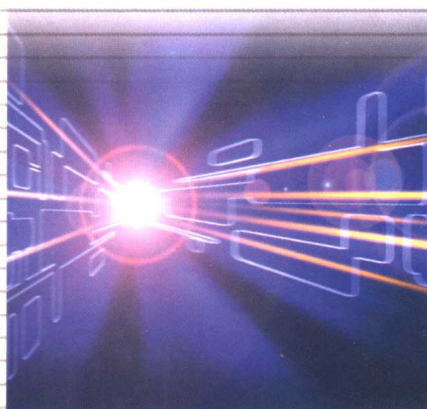


MATLAB

控制工程工具箱 技术手册

魏巍 主编



MATLAB

國防工業出版社

National Defence Industry Press
<http://www.ndip.cn>

MATLAB工具箱技术手册系列

MATLAB

控制工程工具箱

技术手册

魏巍 主编

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书基于 MATLAB 6.5 正式版(Release 13),为读者提供了使用 MATLAB 的实践性指导。本书主要介绍了 MATLAB 中与控制工程相关的 6 个基础工具箱:系统辨识工具箱、控制系统工具箱、鲁棒控制工具箱、模型预测控制工具箱、模糊逻辑工具箱和非线性控制设计模块,同时提供了 MATLAB 中的一些基础知识。在讲解 6 个工具箱的过程中,本书还讲解了一些工程应用方面的背景知识,并对每个函数的功能、语法和参数做了详细的说明,对许多重要的函数都给出了具体的示例程序。

本书可以作为高等院校控制工程专业本科生、研究生教材使用,也可作为广大科研工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

MATLAB 控制工程工具箱技术手册/魏巍主编. —北京:
国防工业出版社,2004.1
(MATLAB 工具箱技术手册系列)
ISBN 7-118-03205-0

I.M... II.魏... III.计算机控制—应用软件,MAT
LAB—技术手册 IV.TP273-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 059829 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 100044)

北京奥隆印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 29 671 千字

2004 年 1 月第 1 版 2004 年 1 月北京第 1 次印刷

印数:1—3000 册 定价:45.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

— 前 言 —

MATLAB 是 Mathworks 公司于 1984 年推向市场的一套高性能的数值计算和可视化软件，它集数值分析、矩阵运算、信号处理和图形显示于一体。经过十几年的发展，MATLAB 已经成为一个国际公认的最优秀的科技应用软件，并且其强大的扩展功能更是为各个工程领域提供了分析和设计的基础。

作为一种科学计算语言，MATLAB 具有极强的适应能力，它用简洁的代码和函数库为编程研究人员提供了直观简单的程序开发环境。如今，MATLAB 已经不仅仅在工程领域有重要的影响，其生命力开始延伸到经济等领域。MATLAB 已成为适合多学科、多种工作平台的功能强大、界面友好、语言自然并且开放性强的大型优秀应用软件，同时也已成为国内外高等院校高等数学、数值分析、数字信号处理、自动控制理论以及工程应用等课程的基本教学工具。

本书主要详细介绍了 MATLAB 与控制工程相关的 6 个基础工具箱：系统辨识工具箱、控制系统工具箱、鲁棒控制工具箱、模型预测控制工具箱、模糊逻辑工具箱和非线性控制设计模块。同时提供了 MATLAB 的一些基础知识。本书在讲解 6 个工具箱的过程中，还讲解了一些工程应用方面的背景知识。

本书区别于其他书的重要之处在于本书结构新颖，逻辑清晰，从全新的角度以“功能”、“语法”、“说明”、“实例”的方式介绍每个函数，能使读者更深刻地理解每个函数的功能和用法，以便在以后的研究中灵活应用。

由于时间仓促，再加上控制工程领域方面有很多专业理论知识，而作者的学识水平有限，错漏之处在所难免，希望广大读者给予批评和指正。

作者

— 目 录 —

第 1 章 MATLAB 基础	1
1.1 MATLAB 的历史	1
1.1.1 MATLAB 的产生	1
1.1.2 MATLAB 的发展	1
1.2 MATLAB 系统构成	1
1.2.1 MATLAB 的系统构成	1
1.2.2 MATLAB 工具箱及应用介绍	2
1.3 开始使用 MATLAB	3
1.3.1 MATLAB 的启动	3
1.3.2 样例	4
1.3.3 MATLAB 初步知识	8
第 2 章 MATLAB 系统辨识工具箱	11
2.1 系统辨识的原理及辨识模型的简介	11
2.1.1 基本原理	11
2.1.2 常用的模型类	12
2.2 系统辨识工具箱函数	13
2.2.1 模型建立和转换的函数介绍	13
2.2.2 非参数模型类的辨识函数介绍	22
2.2.3 参数模型类的辨识函数介绍	25
2.2.4 递推参数模型辨识函数介绍	32
2.2.5 模型验证与仿真函数介绍	37
2.2.6 其他常用函数介绍	43
2.3 系统辨识工具箱图形界面	56
2.3.1 数据视图	56
2.3.2 操作选择	58
2.3.3 模型视图	59
第 3 章 控制系统工具箱	61
3.1 LTI 系统模型及转换	61
3.1.1 LTI 模型	61
3.1.2 LTI 对象及其属性	62
3.1.3 LTI 模型函数	63
3.1.4 模型检测函数	73

3.2	状态空间的实现	74
3.2.1	状态空间的实现	74
3.2.2	状态空间的实现的函数	75
3.3	系统时域响应	81
3.3.1	系统时域响应	81
3.3.2	系统时域延迟	87
3.4	系统频率响应	89
3.5	极点配置	99
3.6	模型的综合处理	102
3.6.1	模型的转换	102
3.6.2	模型的连接	106
3.6.3	模型降阶	114
3.7	LQG 设计	118
3.8	GUI 函数介绍	123
第 4 章	鲁棒控制工具箱	127
4.1	鲁棒控制理论及鲁棒控制工具箱简介	127
4.1.1	鲁棒控制理论概述	127
4.1.2	鲁棒控制工具箱基本数据结构	128
4.2	系统模型建立与转换工具	131
4.2.1	模型建立工具	131
4.2.2	模型转换工具	132
4.3	鲁棒控制工具箱功能函数	140
4.3.1	Riccati 方程求解	141
4.3.2	Riccati 方程条件数	141
4.3.3	矩阵的 Schur 形式	142
4.4	多变量波特图	143
4.4.1	频率响应的特征增益/相位波特图	143
4.4.2	连续和离散系统的奇异值波特图	145
4.4.3	结构奇异值波特图	147
4.5	矩阵因子化技巧	150
4.6	模型降阶方法	151
4.6.1	Schur 相对误差模型降阶方法	152
4.6.2	均衡模型降阶	153
4.6.3	最优 Hankel 最小逼近降阶	154
4.7	鲁棒控制箱综合方法	155
4.7.1	离散和连续情形的 H^2 综合	156
4.7.2	离散和连续情形的 H_∞ 综合	158
4.7.3	H_∞ 综合的 γ 迭代方法	159
4.7.4	H^2 和 H_∞ 范数	160

4.7.5	LQG 优化控制综合	161
4.7.6	LQG 回路传输恢复	162
4.7.7	μ 综合	163
4.7.8	youla 参数化	165
4.8	示例	166
第 5 章	模型预测控制工具箱	171
5.1	系统模型辨识函数	171
5.1.1	数据向量或矩阵的归一化	171
5.1.2	基于线性回归方法的脉冲响应模型辨识	173
5.1.3	脉冲响应模型转换为阶跃响应模型	176
5.1.4	模型的校验	177
5.2	系统矩阵信息及绘图函数	177
5.3	模型转换函数	180
5.4	模型建立和连接函数	186
5.5	控制器设计与仿真	188
5.5.1	基于 MPC 阶跃响应的控制器设计与仿真	188
5.5.2	基于 MPC 状态空间模型的控制器设计与仿真	195
5.6	系统分析函数	205
5.7	模型预测控制工具箱功能函数	208
第 6 章	模糊逻辑工具箱	212
6.1	模糊逻辑理论简介	213
6.1.1	模糊集合	213
6.1.2	模糊关系	214
6.1.3	模糊推理	214
6.2	MATLAB 模糊逻辑工具箱	216
6.2.1	模糊隶属度函数	216
6.2.2	模糊推理系统数据管理函数	224
6.3	逻辑工具箱的图形用户界面	239
6.4	模糊推理系统的高级应用	248
6.5	模糊逻辑工具箱接口及示例函数	254
第 7 章	非线性控制设计模块	259
7.1	NCD 模块的使用	259
7.1.1	建立闭环系统方框图	259
7.1.2	设置约束条件	260
7.1.3	开始优化计算	263
7.2	NCD 模块应用实例	264
7.2.1	问题提出	264
7.2.2	NCD 模块启动	264
7.2.3	设置约束条件	264

7.2.4	优化计算	267
7.3	NCD 模块几个示例	269
7.3.1	PID 控制器优化设计示例	269
7.3.2	多变量状态反馈系统控制优化	272
7.3.3	MIMO PI 控制器设计	276
第 8 章	控制系统的数学描述	280
8.1	控制系统的运动方程	281
8.1.1	微分方程数值解	281
8.1.2	非线性系统描述	286
8.2	控制系统的传递函数描述	290
8.2.1	传递函数的零点和极点	291
8.2.2	传递函数的部分分式展开	296
8.3	控制系统的状态方程描述	300
8.3.1	数学描述	301
8.3.2	对角化与 Jordan 标准型	304
8.3.3	可控规范型	309
8.3.4	可观规范型	312
8.4	控制系统模型转换	315
8.4.1	传递函数向状态方程的转换	315
8.4.2	状态方程向传递函数的转换	319
8.4.3	由方框图求状态方程和传递函数	322
8.5	控制系统的稳定性	326
第 9 章	控制系统时频分析及根轨迹的绘制	331
9.1	时域响应分析	331
9.2	频率响应分析	339
9.2.1	频率响应	339
9.2.2	Bode 图绘制	346
9.2.3	Nyquist 图绘制	350
9.2.4	离散系统的频率响应	354
9.3	根轨迹的绘制	357
第 10 章	传递函数模型控制系统校正	361
10.1	控制系统校正指标和经验公式	362
10.2	系统开环频率特性设计	364
10.3	串联校正	372
10.3.1	PID 校正概述	372
10.3.2	串联校正举例	378
10.4	根轨迹校正	387
10.4.1	Rltool 环境概述	387
10.4.2	根轨迹校正举例	391

第 11 章 控制系统的状态空间设计方法	399
11.1 状态反馈与观测	399
11.1.1 极点配置	400
11.1.2 状态观测器	410
11.2 解耦控制	416
11.3 线性二次型最优控制器设计	424
11.3.1 代数 Riccati 方程求解	424
11.3.2 线性二次型最优控制器设计举例	429
第 12 章 神经网络与控制	436
12.1 神经网络概述	437
12.1.1 神经网络理论基础	437
12.1.2 神经网络控制	439
12.2 MATLAB 神经网络工具箱	440
12.3 神经网络控制举例	447
参考文献	453

第 1 章 MATLAB 基础

1.1 MATLAB 的历史

1.1.1 MATLAB 的产生

MATLAB 的产生是与数学计算紧密联系在一起的。20 世纪 70 年代中期, Celve Moler 及其同事在美国国家基金会的资助下, 开发了 LINPACK 和 EISPACK 的 Fortran 子程序库。70 年代后期, 身为美国新墨西哥州大学计算机系主任的 Celve Moler 在给学生上线性代数课时, 为了让学生能使用 LINPACK 和 EISPACK 程序库又不至于在编程上花费过多时间, 为学生编写使用 LINPACK 和 EISPACK 的接口程序。他将这个接口程序取名为 MATLAB (即 Matrix 和 Laboratory 的前三位字母组合, 意为“矩阵实验室”)。这个程序获得了很大的成功, 受到学生的广泛欢迎。在以后的几年内 MATLAB 在许多大学使用, 并作为面向大众的免费软件广为流传。

20 世纪 80 年代初期, Celve Moler 和 John Little 采用 C 语言编写了 MATLAB 的核心, 合作开发了 MATLAB 第二代专业版, 大大提高了它的运算效率。不久, 他们成立了 MathWorks 公司并将 MATLAB 正式推向商业市场。

1.1.2 MATLAB 的发展

MathWorks 公司正式推出 MATLAB 以后, 经过几十年的研究, 不断完善 MATLAB 的功能, 使其在原有的基础上增加了许多功能。目前 MATLAB 已经成为国际上公认的优秀数学软件之一。现在 MATLAB 已经推出 6.5 版本, 占据了数值型软件市场的主导地位。

MATLAB 在以下的领域里解决各种问题是一个十分有效的工具:

- 工业研究与开发。
- 数学教学, 特别是线性代数。所有基本概念都能涉及。
- 在数值分析和科学计算方面的教学与研究。能够详细地研究和比较各种算法。
- 在诸如电子学、控制理论和物理学等工程和科学学科方面的教学与研究。
- 在诸如经济学、化学和生物学等有计算问题的所有其他领域中的教学与研究。

1.2 MATLAB 系统构成

1.2.1 MATLAB 的系统构成

MATLAB 系统由以下 5 大部分构成:

- MATLAB 语言;
- MATLAB 工作环境;
- MATLAB 数学函数库;
- MATLAB 图形处理系统;
- MATLAB 应用程序接口 (API)。

下面对这五个部分进行详细的介绍。

1. MATLAB 语言

MATLAB 是一个可视化的计算程序,被广泛用于从个人计算机到超级计算机范围内的各种计算机上。MATLAB 包括命令控制、可编程,有上百个预先定义好的命令和函数。这些函数能通过用户自定义函数进一步扩展。

2. MATLAB 工作环境

MATLAB 的工作环境是一个集成化的工作空间,它可以让用户输入输出数据,并提供了 M 文件的集成编译和调试环境。它包括命令窗口、M 文件编辑调试器、MATLAB 工作空间和在线帮助文档。

3. MATLAB 数学函数库

MATLAB 有许多强有力的数学函数,如正弦、指数运算、求解微分方程、傅立叶变换等复杂的函数。例如, MATLAB 能够用一个单一的命令求解线性系统,能够完成大量的高级矩阵处理。

4. MATLAB 图形处理系统

MATLAB 有强有力的二维、三维图形工具。MATLAB 能与其他程序一起使用。例如, MATLAB 的图形功能可以在一个 FORTRAN 程序中完成可视化计算。MATLAB 还提供了图形用户界面定制。

5. MATLAB 应用程序接口 (API)

MATLAB 应用程序接口 (API) 是一个让 MATLAB 语言同 C、FORTRAN 等其他高级编程语言进行交互的函数库,该函数库的函数通过动态连接库 (DLL) 来读写 MATLAB 文件。它的主要功能包括在 MATLAB 中调用 C 和 FORTRAN 程序,以及在 MATLAB 和其他应用程序间建立客户/服务器关系。

1.2.2 MATLAB 工具箱及应用介绍

MATLAB 拥有一个专用的家族产品,用于解决不同领域的问题,例如:信号分析、系统识别和仿真等。这些所谓的工具箱都用于 MATLAB 的计算和画图。他们通常是 M 文件和高级 MATLAB 语言的集合,以使得用户可以方便地修改函数的原代码,或增加新的函数。用户还可以很方便地结合使用不同工具箱中的技术来设计针对某个问题的用户解决方案。由于 MATLAB 每年都会开发出一些新的工具箱,所以,在一般情况下,工具箱的列表不是固定不变的,目前 MATLAB 中工具箱的最新信息可以在 <http://www.mathworks.com/products/>看到。这些工具箱主要包括:

1. 应用数学类工具箱

- 模糊逻辑工具箱
- 优化工具箱

- 样条工具箱
- 统计工具箱
- 偏微分方程工具箱
- 2. 电子技术类工具箱
 - 信号处理工具箱
 - 小波工具箱
 - 通信工具箱
- 3. 自动控制类工具箱
 - 控制系统工具箱
 - 线性矩阵不等式控制工具箱
 - 频域系统辨识工具箱
 - 鲁棒控制工具箱
 - 模型预测控制工具箱

同时 MATLAB 还提供了许多专业的工具箱和开发包, 比如 Motorola DSP Developer's Kit (Motorola DSP 开发包) 等。这些工具箱和开发包为非常专业的应用提供了很大方便。

此外, MATLAB 还有一个功能强大的、可视化的、交互环境的工具 SIMULINK, 用于模拟非线性动态系统。SIMULINK 提供一个用于创建动态系统对角模块的图形用户界面。由于 SIMULINK 充分利用了窗口技术, 用户可以很容易地创建线性的、非线性的、离散的、连续的和混合的模型。由于点击—拖动操作和鼠标交互的使用, 来自块库的组件可以相互连结使用。在做“what if”分析的过程中, 可以改变参数。SIMULINK 与 MATLAB 充分集成, 与 MATLAB 和 MATLAB 工具箱一起使用, 用户可以在建模、设计、分析和仿真的不同阶段之间移动。SIMULINK 是可以进行扩展的。该环境中包含了可选工具集, 如提高仿真速度。与 SIMULINK 相联系的工具箱成为块集, 块集扩展了有专门设计和分析能力的块库。

需要了解 MATLAB 中工具箱的详细情况, 可以输入 demo (以前版本可以输入 expo), 然后选择 toolbox 得到。随着 MATLAB 版本的升级, 工具箱也有一些改动, 相应工具箱的函数或是使用方法有一定的差异, 本书是基于 MATLAB6.5 的。

1.3 开始使用 MATLAB

1.3.1 MATLAB 的启动

不同的计算机系统, MATLAB 的启动也不一样。在 Windows 和 Macintosh 系统中, 程序通常通过点击一个图标而启动。在 UNIX 系统中, 程序是通过在命令行系统提示符后键入如下字符启动: matlab。

如果上述工作有问题, 可请教系统管理员。当启动 MATLAB 时, 如果 matlabrc.m 和 startup.m 文件存在, 则执行这些文件。在这些文件中, 为满足个人需要, 用户可以给定命令以调整 MATLAB。例如, constants 用于设置图形等。在一个多用户系统上, 系统管理员存储 matlabrc.m 文件, 但你也能为自己的使用创建文件 startup.m。要退出 MATLAB, 键入 quit 或 exit。在 Windows 2000 上打开的 MATLAB6.5 窗口如图 1-1 所示。

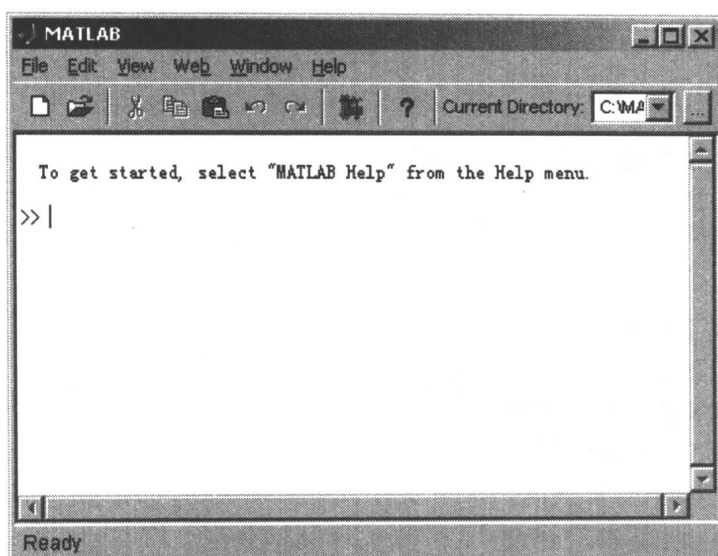


图 1-1 MATLAB 命令窗口

除此之外，对一些系统有指定的菜单选择。例如，在 Windows 和 Macintosh 系统中，在文件菜单下可以找到选项 quit。当编辑或执行 MATLAB 时，下列的快捷键十分有用。通常因为不同的平台使用不同的键，因此，给定了一些替换键。用户在自己的系统上试一下这些键，注意哪些键组合使用，见表 1-1。

表 1-1 特殊的功能键

快 捷 键	说 明
↑ 或 Ctrl_p	恢复前面的命令
↓ 或 Ctrl_n	恢复当前命令之后键入的命令
→ 或 Ctrl_f	向右移动一个字符
← 或 Ctrl_b	向左移动一个字符
Delete, Backspace	删除字符
Ctrl_l 或 Ctrl_←	向左移动一个字
Ctrl_r 或 Ctrl_→	Ctrl_r 或 Ctrl_→ 向右移动一个字
Ctrl_a 或 Home	移动到行的第一个字符
Ctrl_e	Ctrl_e 移动到行尾
Ctrl_k	删除到行尾
cedit	cedit 在不同的快捷键间转换

1.3.2 样例

MATLAB 能用于计算，并以二维和三维图形显示各种函数。在 MATLAB 函数中包括了所有主要的数学函数和大量的高级函数。

【例 1】 用简短的 MATLAB 命令计算并绘制在 $0 \leq x \leq 6$ 范围内的 $\sin(2x)$ 、 $\sin(x^2)$ 和 $(\sin x)^2$ 。

`x = linspace(0, 6); % 创建一个向量 x。`

`y1 = sin(2*x); % 向量 y1 等于 x 坐标上某一 x 的  $\sin(2x)$  值。`

`y2 = sin(x.^2); % 向量 y2 等于  $\sin(x.^2)$ ，同上。`

`y3 = (sin(x)).^2; % 向量 y3 等于  $(\sin(x)).^2$ ，同上。`

命令 `plot(x,y1)` 绘制向量 `y1`，`y1` 作为向量 `x` 的一个函数。由此能够很容易地在一个图上绘制 $\sin(2x)$ 、 $\sin(x^2)$ 和 $(\sin x)^2$ 的曲线并正确地标记它们，如图 1-2 所示。

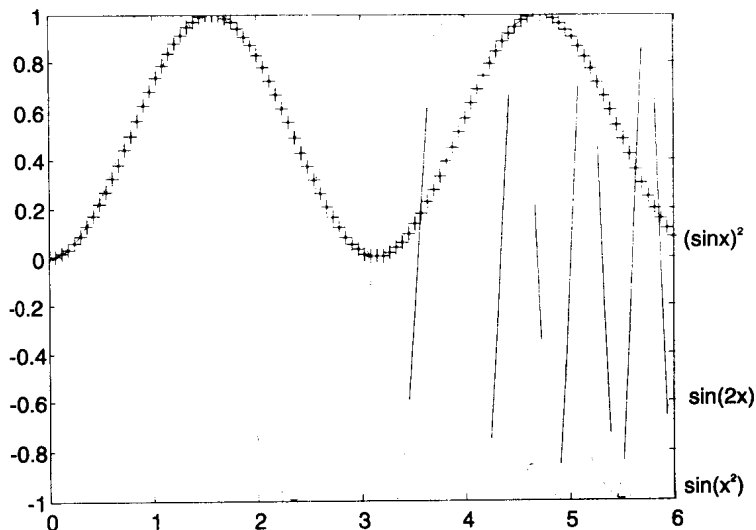


图 1-2 绘制在同一幅图形中的三条曲线

【例 2】 绘制三维图形。MATLAB 可以很好地绘制三维图形，在图 1-3 中分别用 `surf`、`mesh`、`waterfall` 和 `contour3` 方法绘制图形。

程序分别如下：

(1) `surf`

`k = 5;`

`n = 2^k-1;`

`[x,y,z] = sphere(n);`

`c = hadamard(2^k);`

`surf(x,y,z,c);`

`colormap([1 1 0; 0 1 1])`

`axis equal`

(2) `mesh`

`[X,Y] = meshgrid(-3:125:3);`

`Z = peaks(X,Y);`

`meshc(X,Y,Z);`

`axis([-3 3 -3 3 -10 5])`

(3) waterfall

```
[X,Y,Z] = peaks(30);
```

```
waterfall(X,Y,Z)
```

(4) contour3

```
[X,Y] = meshgrid([-2:.25:2]);
```

```
Z = X.*exp(-X.^2-Y.^2);
```

```
contour3(X,Y,Z,30)
```

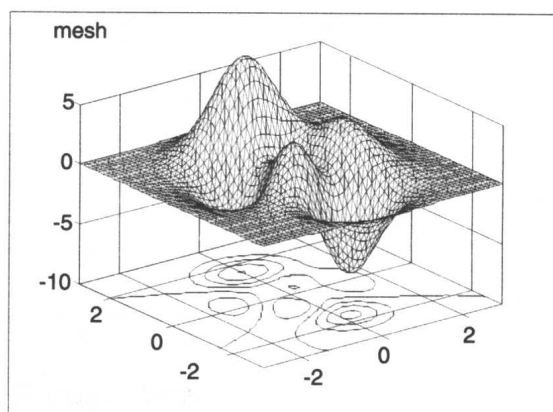
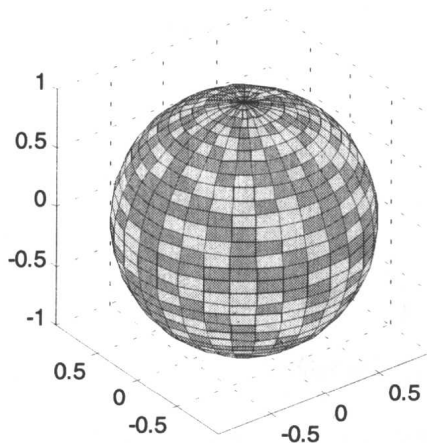
```
surface(X,Y,Z,'EdgeColor',[.8 .8 .8],'FaceColor','none')
```

```
grid off
```

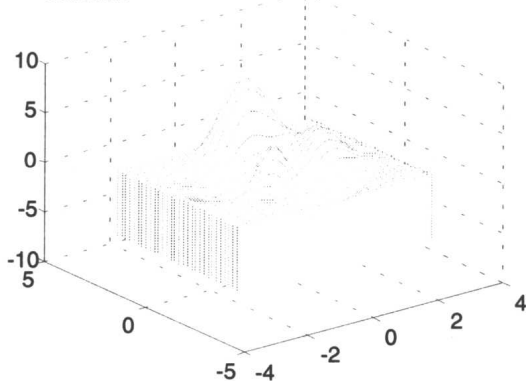
```
view(-15,25)
```

```
colormap cool
```

surf



waterfall



contour3

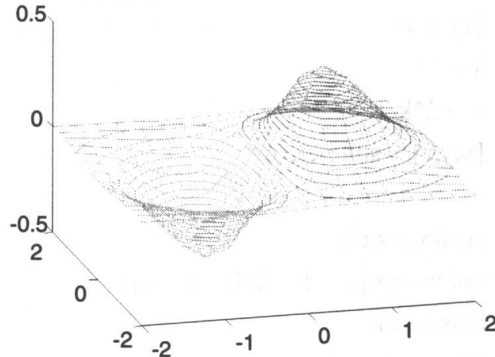


图 1-3 使用四种方法绘制函数图形

【例 3】 示例程序。MATLAB 中提供了丰富的示例程序。在打开 MATLAB 后的命令提示符下输入 demo，可以进入演示界面，选择 toolbox，如图 1-4 所示。

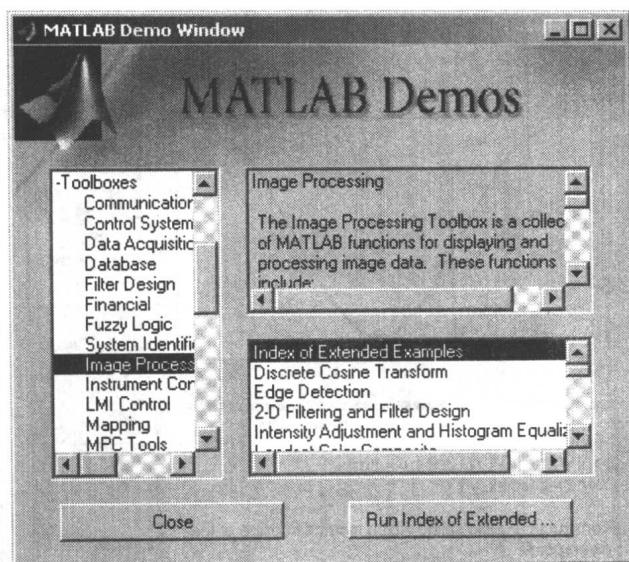


图 1-4 演示窗口

选择相应的工具箱，单击右下角的演示，可以获得对应该工具箱的演示窗口。例如运行样条工具箱的演示得到图 1-5。

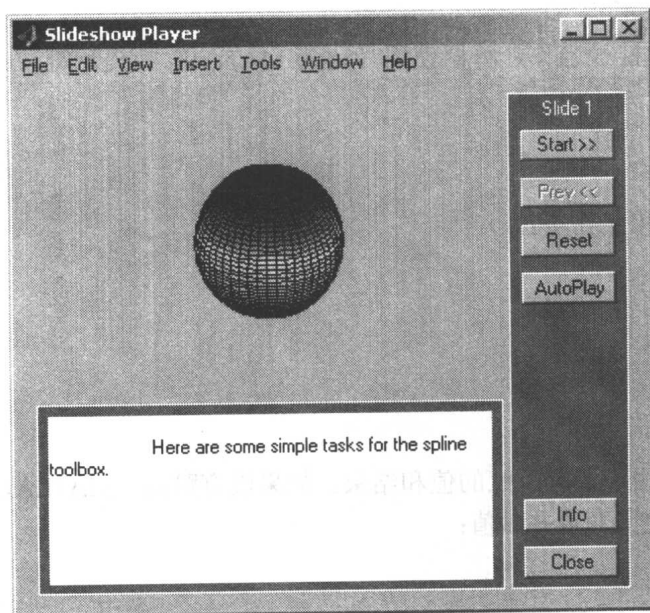


图 1-5 样条曲线工具箱的演示窗口

选择窗口右侧的 Start 按钮，可以运行演示程序，如图 1-6 所示。在窗口的下方显示了该插值函数的程序，在上方的图形区则绘制了相应的图形。用户可以点击 next 按钮观察下一个演示，也可以单击 Autoplay 观察自动播放演示。

对 MATLAB 工具箱不熟悉的用户可以通过 demo 对工具箱的功能有个大概的了解。

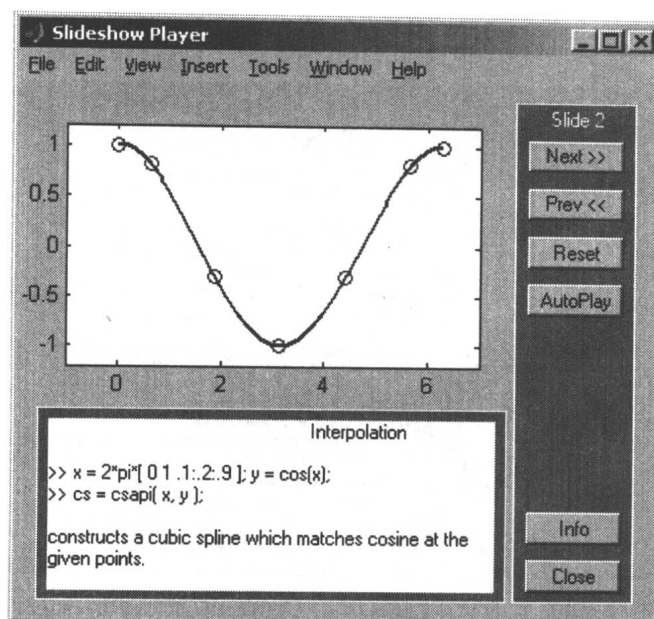


图 1-6 样条曲线演示

1.3.3 MATLAB 初步知识

通常, MATLAB 能被当作计算器使用 (>>为 MATLAB 的提示符):

```
>> 4*45+4596
```

```
ans =
```

```
4776
```

同一行上可以有多个命令:

```
>> 2^40,sin(pi/4)
```

```
ans =
```

```
1.0995e+012
```

```
ans =
```

```
0.7071
```

一般来讲, 变量用于保存所赋的值和结果。如果没有赋值, MATLAB 将结果存放在名为 ans 的变量中。现在定义变量并赋值:

```
>> x=238
```

```
x =
```

```
238
```

```
>> y=x^2
```

```
y =
```

```
56644
```

圆括号'()', 可在数学式子中使用。

注意: 在命令行尾的分号 ';' 是 MATLAB 'quietly' 执行赋值命令, 即在屏幕上不回显