

理论与实践并重、站在工程与科技的前沿

MATLAB

数字信号处理与应用

张德丰◎编著

- 取材科学、结构严谨
- 科学计算的最新技术
- 数字信号处理的最佳参考

清华大学出版社

MATLAB 数字信号处理与应用

张德丰 编著

清华大学出版社

北 京

内 容 简 介

本书采用最新版 MATLAB R2009a, 以概要形式讲述基本理论, 并紧密结合实践应用研究。主要介绍了 MATLAB 与振动基础、离散时间信号与系统及其 MATLAB 实现、信号的变换、数据采集及模拟滤波器介绍、数字滤波器的设计及其 MATLAB 实现、随机信号及参数建模分析、小波变换分析、MATLAB 在地震及雷达信号中的应用。

本书主要面向广大从事数字信号处理的电子工程设计人员, 大专院校通信工程、电子工程等专业熟悉信号处理的教师、研究生和高年级学生, 也可作为教材或者工程辅导书。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签, 无标签者不得销售。

版权所有, 侵权必究。侵权举报电话: 010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

MATLAB 数字信号处理与应用/张德丰编著. —北京: 清华大学出版社, 2010.1

ISBN 978-7-302-21688-9

I. M… II. 张… III. 数字信号-信号处理-计算机辅助计算-软件包, MATLAB IV. TN911.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 239591 号

责任编辑: 许存权 纪文远

封面设计: 刘 超

版式设计: 杨 洋

责任校对: 焦章英 姜 彦

责任印制:

出版发行: 清华大学出版社

地 址: 北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn>

邮 编: 100084

社 总 机: 010-62770175

邮 购: 010-62786544

投稿与读者服务: 010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈: 010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 刷 者:

装 订 者:

经 销: 全国新华书店

开 本: 185×260 印 张: 24.25 字 数: 560 千字

版 次: 2010 年 1 月第 1 版 印 次: 2010 年 1 月第 1 次印刷

印 数: 1~4000

定 价: 38.00 元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题, 请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话: 010-62770177 转 3103 产品编号: 035384-01

前 言

数字信号处理 (Digital Signal Processing, DSP) 是一门交叉性的学科, 其理论基础涉及众多学科, 其成果又为这些学科的发展起着重要的促进作用; 在信息、通信、雷达、航空航天及生物医学乃至人类生活的各个方面都有应用, 已经成为高新科技领域中占据重要地位的新兴学科。

MATLAB 是一种工程计算的高级语言。自 1984 年美国的 MathWorks 公司推出其 DIS 版本后, 又相继推出了 Windows 版本及多个更新的版本, 使得 MATLAB 的覆盖领域越来越广。到目前为止, 已经包括仿真工具 Simulink 及其他如自动控制、信号处理、图像处理、神经网络、模式识别、小波分析、数理统计、生物信息等 30 多个工具箱。由于其灵活的编程方法和极高的编程效率, 加上在用户界面和功能上的不断扩展, 自推出以来, 备受广大高校师生和科研人员的青睐。

本书采用 MATLAB 最新版本 R2009a 缩写, 在该版本中, 产品模块进行了一些调整, 将 MATLAB Builder for COM 的功能集成到 MATLAB Builder for .net 中, Financial Time Series Toolbox 的功能集成到 Financial Toolbox 中。MATLAB 将高性能的数值计算和可视化集成在一起, 并提供了大量的内置函数, 从而广泛应用于科学计算、控制系统、信息处理等领域的分析、仿真和设计工作。利用 MATLAB 产品的开放式结构, 接口方式包括了联合建模、数据共享、开发流程衔接等, 可以非常容易地对 MATLAB 的功能进行扩充, 从而在不断深化对问题认识的同时不断完善 MATLAB 产品, 以提高其竞争力。

MATLAB 开放的产品体系使其成为诸多领域的开发首选软件, 它拥有 500 余家第三方合作伙伴, 分布在科学计算、机械动力、化工、计算机通信、汽车、金融等领域。

本书以概要形式讲述基本理论, 并紧密结合实践应用研究。全书共 8 章: 第 1 章概要介绍 MATLAB 与振动基础, 包括 MATLAB 的基础知识及振动的知识; 第 2 章介绍离散时间信号与系统及其 MATLAB 实现, 包括数字信号处理的基础知识、信号类型与 MATLAB 实现等内容; 第 3 章介绍信号的变换, 包括 Fourier 变换、快速 Fourier 变换的性质、Z 变换的定义及收敛域等内容; 第 4 章介绍数据采集及模拟滤波器, 包括数据采集、滤波原理等内容; 第 5 章介绍数字滤波器的设计及其 MATLAB 实现, 主要包括由模拟滤波器设计 IIR 滤波器及 FIR 滤波器的设计等内容; 第 6 章介绍随机信号及参数建模分析; 第 7 章介绍小波变换分析, 主要包括小波变换及小波变换应用等内容; 第 8 章介绍 MATLAB 在地震及雷达信号中的应用。

本书简洁明了地指出所介绍的函数、方法的理论背景, 同时又紧密联系实际, 以具体的示例说明了函数、方法的具体应用。在示例中强调了如何用 MATLAB 解决数字信号中的问题、难题, 以节省数字信号处理工作者的时间和精力, 提高数字信号处理的效率。与此同时, 本书还着重于数字信号的具体应用, 通过具体的分析和详细的示例, 读者不仅可以

目 录

第 1 章	MATLAB 与振动基础	1
1.1	MATLAB 界面的介绍.....	1
1.2	通用命令介绍	6
1.3	MATLAB 变量及其操作.....	10
1.3.1	变量与赋值.....	10
1.3.2	数据的输出格式.....	11
1.4	语言结构	12
1.4.1	M 文件	12
1.4.2	程序流程控制.....	15
1.4.3	输入与输出.....	16
1.5	矩阵及矩阵运算	22
1.5.1	矩阵的构造.....	22
1.5.2	矩阵的基本运算.....	24
1.5.3	特殊矩阵和数组.....	27
1.5.4	矩阵的拆分.....	29
1.6	数据分析	32
1.7	振动的知识	42
1.7.1	振动概述.....	42
1.7.2	振动的合成.....	47
第 2 章	离散时间信号与系统及其 MATLAB 实现.....	54
2.1	数字信号处理的基础知识	54
2.1.1	时域离散信号.....	54
2.1.2	时域离散系统.....	55
2.2	信号类型与 MATLAB 实现.....	56
2.2.1	典型信号及 MATLAB 实现.....	56
2.2.2	单位阶跃信号及 MATLAB 实现.....	64
2.3	离散时间信号——序列	66
2.3.1	序列的定义.....	66
2.3.2	序列的基本运算.....	67
2.4	线性连续时间系统	69
2.4.1	线性连续时间系统描述.....	70
2.4.2	脉冲响应及其表示的系统输出.....	70

2.4.3	系统的频率响应.....	71
2.5	离散系统及其 MATLAB 实现.....	72
2.5.1	离散线性系统基本概念.....	72
2.5.2	线性移不变系统.....	73
2.5.3	常系数线性差分方程.....	76
2.5.4	离散系统的 MATLAB 实现.....	78
第 3 章	信号的变换.....	87
3.1	Fourier 级数与 Fourier 变换.....	87
3.1.1	周期函数 Fourier 变换.....	87
3.1.2	离散 Fourier 变换.....	88
3.1.3	信号的 Fourier 分解与合成举例.....	91
3.2	复数形式的 Fourier 级数及其应用.....	96
3.2.1	理论基础.....	96
3.2.2	Fourier 变换程序.....	97
3.2.3	应用示例.....	98
3.3	Fourier 变换的性质.....	100
3.3.1	线性性.....	101
3.3.2	时移定理.....	102
3.3.3	频移定理.....	104
3.3.4	偶函数和奇函数与 Fourier 变换后实部和虚部的关系.....	106
3.3.5	褶积定理.....	108
3.4	快速 Fourier 变换的性质变换.....	109
3.4.1	直接 DFT 算法存在的问题及改进.....	109
3.4.2	按时间抽取 (DIT) 基-2FFT 算法.....	110
3.4.3	按频率抽取 (DIF) 基-2 点 FFT 算法.....	113
3.4.4	混合基 FFT 算法.....	115
3.4.5	基-4FFT 算法.....	116
3.4.6	快速傅里叶反变换.....	117
3.4.7	线性卷积 FFT 算法.....	117
3.4.8	重叠保留法与重叠相加法.....	119
3.5	Z 变换的定义及收敛域.....	123
3.5.1	Z 变换的定义.....	123
3.5.2	Z 变换的收敛 (ROC).....	123
3.6	Z 变换的性质.....	126
3.6.1	线性性质.....	126
3.6.2	序列的移位.....	126
3.6.3	序列的线性加权.....	126

3.6.4	乘以指数序列.....	127
3.6.5	序列的倒置.....	127
3.6.6	时域卷积定理.....	127
3.6.7	复卷积定理.....	128
3.6.8	初值定理.....	129
3.6.9	终值定理.....	129
3.6.10	复序列的共轭.....	129
3.6.11	帕斯瓦尔 (Parseval) 定理.....	130
3.7	Z 反变换.....	130
3.7.1	留数法.....	131
3.7.2	部分分式展开法.....	131
3.7.3	长除法.....	132
3.8	Z 变换与连续信号的拉普拉斯变换、傅里叶变换的关系.....	134
3.8.1	Z 变换与拉普拉斯变换的关系.....	134
3.8.2	Z 变换与傅里叶变换的关系.....	135
3.9	拉普拉斯变换.....	136
3.9.1	拉普拉斯变换介绍.....	136
3.9.2	拉普拉斯反变换.....	137
3.9.3	拉普拉斯变换法求解微分方程.....	139
第 4 章	数据采集及模拟滤波器介绍.....	141
4.1	数据采集简介.....	141
4.1.1	数据采集系统.....	141
4.1.2	数据采集工具箱简介.....	142
4.2	数据采集过程.....	144
4.2.1	创建一个设备对象.....	144
4.2.2	添加通道或数据线.....	146
4.2.3	配置并返回属性.....	148
4.2.4	获取或输出数据.....	154
4.3	保存和加载过程.....	158
4.3.1	保存和加载对象.....	158
4.3.2	记录信息.....	159
4.4	滤波原理.....	161
4.5	模拟滤波器设计原理.....	162
4.5.1	信号无失真传输的条件.....	162
4.5.2	理想滤波器的特性.....	163
4.5.3	模拟滤波器传递函数设计原理.....	163
4.6	模拟原型滤波器.....	164

4.6.1	Butterworth 滤波器	164
4.6.2	Chebyshev I 型	166
4.6.3	Chebyshev II 型滤波器	168
4.6.4	椭圆滤波器	170
4.6.5	Bessel 滤波器	171
4.7	模拟滤波器频率变换	173
4.8	模拟滤波器最小阶数选择	177
4.8.1	滤波器最小阶数选择原理	177
4.8.2	滤波器最小阶数选择函数	178
4.9	基于完全设计函数的模拟滤波器设计	179
第 5 章	数字滤波器的设计及其 MATLAB 实现	186
5.1	数字滤波器结构	186
5.2	由模拟滤波器设计 IIR 滤波器	188
5.2.1	脉冲响应不变法	188
5.2.2	双线性变换法	197
5.3	从模拟滤波器低通原型到数字滤波器	202
5.3.1	模拟低通—数字低通变换	202
5.3.2	模拟低通—数字高通变换	204
5.3.3	模拟低通—数字带通变换	206
5.3.4	模拟低通—数字带阻变换	209
5.4	从原型低通滤波器到其他各型数字滤波器的变换	210
5.4.1	数字低通—数字低通	211
5.4.2	数字低通—数字高通	211
5.4.3	数字低通—数字带通	212
5.4.4	数字低通—数字带阻	212
5.5	FIR 滤波器的设计	214
5.5.1	线性相位和滤波器的特性	214
5.5.2	FIR 数字滤波器的窗函数及 MATLAB 实现	225
5.5.3	FIR 滤波器阶数估计	235
5.6	FIR 数字滤波器的最优化设计	237
5.6.1	非线性最优法设计等波纹滤波器	239
5.6.2	插值解法	240
5.6.3	Remez 交替算法	240
5.7	IIR 与 FIR 数字滤波器的比较	244
第 6 章	随机信号及参数建模分析	246
6.1	随机信号基础	246
6.1.1	定义	246

6.1.2	离散随机过程概率分布.....	246
6.1.3	离散随机过程的频域统计描述.....	247
6.1.4	随机数的产生.....	248
6.1.5	随机变量的概率密度计算.....	251
6.2	随机信号的数字特征	258
6.2.1	均值、均方值、方差.....	258
6.2.2	离散随机信号.....	258
6.2.3	估计.....	259
6.3	随机信号的自相关与协方差.....	260
6.3.1	相关函数.....	260
6.3.2	协方差函数.....	262
6.4	功率谱估计	264
6.4.1	功率谱密度.....	264
6.4.2	周期图法.....	265
6.4.3	最大熵法.....	274
6.4.4	多窗口法.....	275
6.4.5	多信号分类法.....	276
6.5	倒谱分析	278
6.6	时域建模	279
6.6.1	3种参数模型.....	279
6.6.2	时域建模原理.....	281
6.6.3	线性预测方法.....	288
6.7	频域建模	293
第7章	小波变换分析	297
7.1	小波变换	297
7.1.1	连续小波变换.....	297
7.1.2	离散小波变换.....	299
7.1.3	小波重构.....	306
7.1.4	小波包.....	317
7.2	小波变换应用	323
7.2.1	小波突变.....	324
7.2.2	信号及图像小波除噪与压缩函数.....	327
第8章	MATLAB 在地震及雷达信号中的应用	344
8.1	地震观测系统的仿真和地面运动的恢复.....	344
8.1.1	基本理论.....	344
8.1.2	地震观测系统的 MATLAB 应用.....	344
8.2	雷达信号的产生	354

8.2.1	脉冲幅度调制.....	354
8.2.2	线性调频信号.....	356
8.2.3	相位编码信号.....	358
8.2.4	相位编码内线性调频混合调制信号.....	360
8.3	随机热噪声分析.....	361
8.3.1	服从高斯分布的热噪声.....	362
8.3.2	服从均匀分布的热噪声.....	363
8.3.3	服从指数分布的热噪声.....	364
8.3.4	服从瑞利分布的热噪声.....	366
8.4	数字处理技术在雷达信号中的处理.....	367
8.4.1	固定对消.....	367
8.4.2	动目标显示与检测.....	367
8.4.3	恒虚警处理.....	370
8.4.4	积累处理.....	374
	参考文献.....	378

第 1 章 MATLAB 与振动基础

MATLAB 的中文含义是“矩阵实验室”，是由 MathWorks 公司推出的数字类科技应用软件，其 DOS 版本（MATLAB 1.0）发行于 1984 年，现已推出了其最新版本 MATLAB R2009a。经过二十多年的不断发展和完善，MATLAB 现已发展成为由基本语言、工作环境、图形处理系统、数学函数库以及应用程序接口等五大部分组成的强大数学应用软件。

MATLAB 是一个交互式系统，其基本数据元素是无须定义的数组，与采用 BASIC、C 和 FORTRAN 语言编写程序相比，可以花费较少的时间来解决众多的数值问题，大大提高了编程效率，往往可以达到事半功倍的效果。MATLAB 特别适用于研究、解决工程和数学问题，典型应用包括一般的数值计算、算法原型以及通过矩阵公式解决一些特殊问题，极大地促进了自动控制理论、数理统计、数字信号处理等学科的发展。

MATLAB 最重要的特点就是它的易扩展性。每个 MATLAB 用户都可成为对其有所贡献的作者之一，并可创造自己的应用程序。在 MATLAB 近几年的发展过程中，有许多科学家、数学家和工程师等开发了一些新的有价值的应用程序，所有程序完全不需要使用底层代码来编写，从而极大地促进了 MATLAB 的发展。

1.1 MATLAB 界面的介绍

启动 MATLAB 后，其界面如图 1-1 所示（其外观可以根据需要设置）。

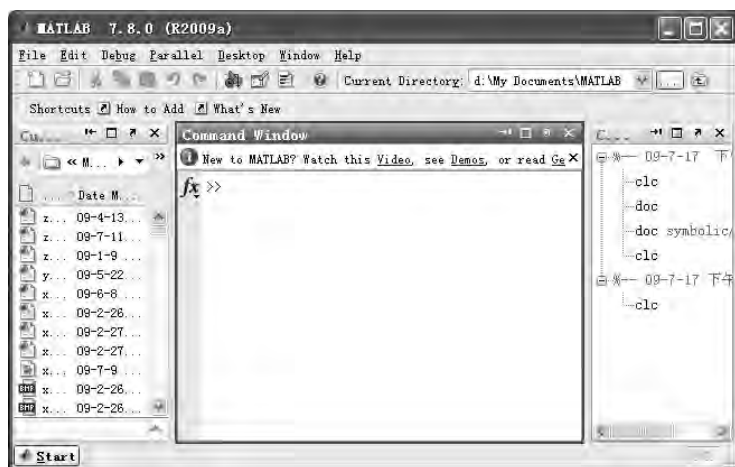


图 1-1 MATLAB 界面

MATLAB 界面中主要包括表 1-1 所示的几种工具，默认情况下只显示其中的部分工具。

表 1-1 MATLAB 界面中的几种工具

工 具	描 述
数组编辑器	查看表格形式的数组内容并编辑数组的值
命令窗口	运行 MATLAB 函数
命令历史窗口	显示命令窗口中输入的命令, 可以从该窗口中复制和运行命令
当前路径浏览器	用于进行打开、查看和管理等操作
编辑器/调试器	创建、编辑和调试 M 文件
图形窗口	创建、修改、查看和打印 MATLAB 图形
帮助浏览器	查看和搜索所有 MathWorks 产品的文档
Profiler 窗口	用图形界面改进 M 文件的运行
启动按钮	运行工具和获取所有 MathWorks 产品的文档, 并创建和使用 MATLAB 快捷方式
Web 浏览器	查看 HTML 及与 MATLAB 相关的信息
工作空间浏览器	查看和改变工作空间中的内容

(1) 启动按钮

在 MATLAB 主界面中单击 Start 按钮, 将弹出如图 1-2 所示菜单, 在其中选择所需命令, 即可直接打开 MATLAB 的相关工具。

(2) 命令窗口

命令窗口主要用于输入数据、运行 MATLAB 函数和脚本并显示结果。选择 Desktop→Command Window 命令, 即可打开命令窗口, 如图 1-3 所示。

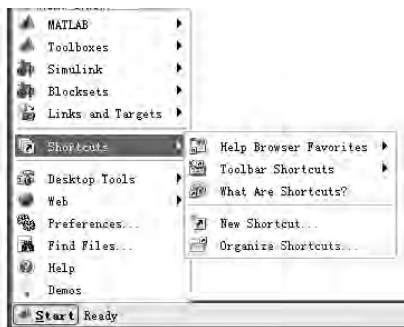


图 1-2 Start 菜单

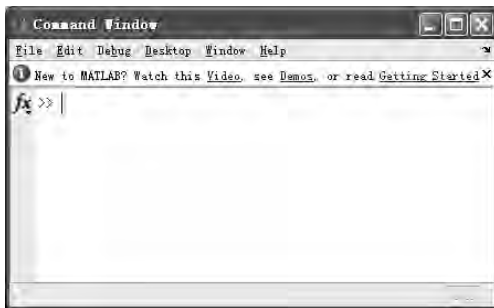


图 1-3 命令窗口

如果喜欢简单的没有其他工具窗口的命令行界面, 选择 Desktop→Command Window Only 命令即可, 其中“>>”符号是输入函数的提示符。

当 MATLAB 在命令窗口中显示“K>>”提示符时, 表示当前处于调试模式; 输入“dbquit”, 即可返回正常模式。

在操作系统命令前添加“!”, 可以在不退出 MATLAB 的情况下调用工具或其他可执行程序。例如!dir, 可以调用 DOS 的“dir”命令。如果希望外部程序完成任务或者退出以后返回 MATLAB, 可以在命令行末尾添加“&”字符, 如!dir&。

(3) 命令历史窗口

命令历史窗口如图 1-4 所示, 用于显示命令窗口中最近输入的所有语句。

通过 Desktop 菜单或在命令窗口中输入“command history”命令，即可打开命令历史窗口。可以将命令历史窗口中的语句复制到命令窗口或其他窗口中。直接双击命令历史窗口中的语句，可以执行该语句。

(4) 工作空间窗口

MATLAB 工作空间由一系列变量组成，主要用于管理变量，具有新建、编辑、保存、载入、删除和打印变量等功能，如图 1-5 所示。

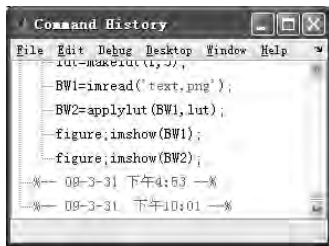


图 1-4 命令历史窗口

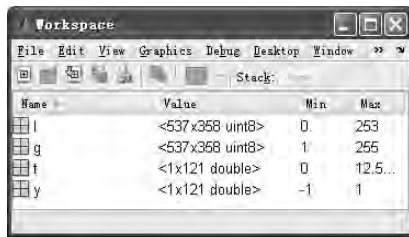


图 1-5 工作空间窗口

可以通过使用函数、运行 M 文件和载入已经保存的工作空间来添加变量。例如，输入：

```
>> t=0:pi/30:4*pi;
```

```
>> y=sin(t);
```

工作空间即会包括 y 和 t 这两个变量，每个变量有 121 个值。

空间浏览器可以显示每个变量的名称、值、数组大小和类型。利用 who 函数可以列出当前工作空间中的所有变量，使用 whos 函数则可以列出所有变量名称、大小、占用空间和类型等信息。例如：

```
>> who
```

Your variables are:


```
I g t y
```


```
>> whos
```

Name	Size	Bytes	Class	Attributes
I	537x358	192246	uint8	
g	537x358	192246	uint8	
t	1x121	968	double	
y	1x121	968	double	

可用 exist 函数查看指定变量是否在工作空间中。如果变量在空间中，返回值为 1，否则为 0。


退出 MATLAB 时，工作空间中的内容随之清除。因此，可以将当前工作空间中的部分或全部变量保存到一个 MAT 文件中，以后需要的时候可以随时载入。


选择 File→Save Workspace As 命令或者单击工作空间浏览器工具栏中的  按钮，可以保存所有变量。如果只需要保存部分变量，按住 Ctrl 键，在工作空间浏览器中单击需要选取的多个变量，然后单击鼠标右键，从弹出的快捷菜单中选择“Save As”命令即可。

要载入空间变量，只需单击工作空间浏览器工具栏中的  按钮，然后选择需要载入的

文件即可。需要注意的是，如果文件中的变量名与已有变量名相同，则覆盖已有变量名。此外，也可以在命令窗口中输入“load”命令载入变量。

(5) 数组编辑器

选择变量后，单击按钮可将变量从工作空间中删除。

通过数组编辑器可以电子表格的形式查看和编辑数值数组、字符串、字符串单元数组和结构。在工作空间浏览器中选择要打开的变量，然后单击按钮，即可打开数组编辑器，如图 1-6 所示。

在数组编辑器中可以实现对变量数据的复制、剪切和粘贴等操作。

(6) 当前目录浏览器

选择 Desktop→Current Directory 命令，或者在命令窗口输入“filebrowser”命令，即可打开当前目录浏览器，如图 1-7 所示。

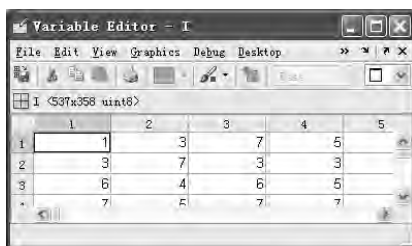


图 1-6 数组编辑器



图 1-7 当前目录浏览器

当前目录浏览器的主要功能：

- 查看和改变路径。
- 创建、重命名、复制和删除路径及文件。
- 打开、运行和查看文件的内容。
- 获取源控制特性。

(7) 帮助浏览器


使用帮助浏览器可以搜索和查看所有 MathWorks 产品的文档和 demo，有助于用户自学、在线查询和答疑解惑。在 MATLAB 主界面中的工具栏中单击按钮，即可打开帮助浏览器，如图 1-8 所示。



图 1-8 帮助浏览器

帮助浏览器主要由左右两个区域组成：左边是树形结构的目录区域，用来查找信息；右边是显示区域，用于查看和显示信息。

树形目录区域有 4 个选项卡，分别介绍如下。

- ❑ Contents 选项卡：查看文档内容的标题和目录。
- ❑ Index 选项卡：根据指定关键字在文档中进行查找。
- ❑ Search 选项卡：在文档中查找指定的单词。
- ❑ Demos 选项卡：查看和运行 MathWorks 产品的演示程序。

除了帮助浏览器之外，还可以使用 `help` 函数获取帮助。在命令窗口中输入“`help`”命令，即可获得当前安装的 MathWorks 产品的简单信息；如果 `help` 后面跟工具箱或函数的名称，还可以获取更为详细的帮助。帮助内容显示在命令窗口中，如图 1-9 所示。

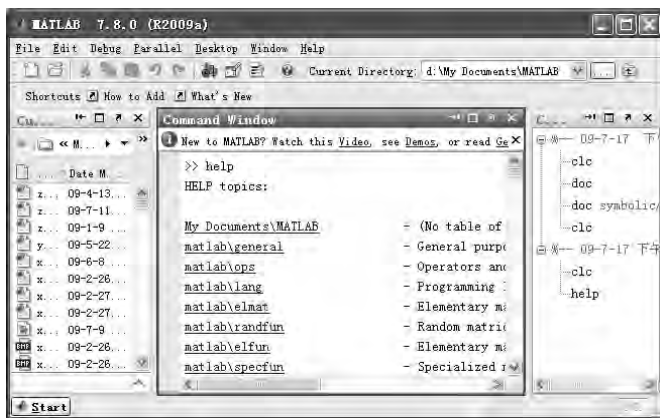


图 1-9 help 命令的应用

也可以使用 `doc` 函数获取指定函数的帮助，帮助内容通过帮助浏览器显示。例如，使用 `doc sin` 语句可以在帮助浏览器中显示 `sin` 函数的文档，如图 1-10 所示。

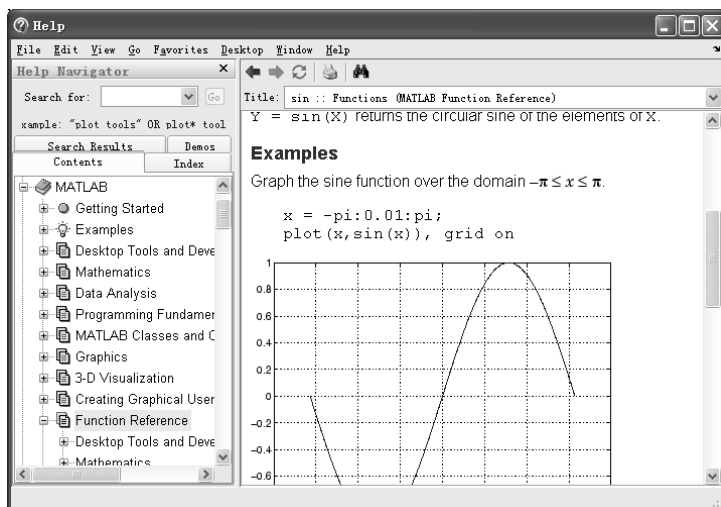


图 1-10 doc 函数的应用

1.2 通用命令介绍

1. 管理命令与函数

(1) path、addpath 及 rmpath

语法:

```
p=path
path('newdir')
rmpath('directory')
addpath('directory')
addpath('dir1', 'dir2', 'dir3'...)
addpath('dir1', 'dir2', 'dir3'... '-flag')
addpath dir1 dir2 dir3... -flag
```

说明:

- p=path: 搜索路径字符串值, 返回字符串变量 p。
- path('newdir'): 搜索路径改变为字符串'newdir'指定的路径。
- rmpath('directory'): 删除'directory'路径。
- addpath('directory'): 添加'directory'路径。
- addpath('dir1', 'dir2', 'dir3'...): 添加所有指定的目录路径到顶部。使用每个目录的完整路径名。
- addpath('dir1', 'dir2', 'dir3'... '-flag'): 将指定的目录添加到顶部或底部的路径, 这取决于标志值。

addpath dir1 dir2 dir3... -flag: 引号的语法格式。

(2) doc: 读入超文本文件

语法:

```
doc
doc function
doc toolbox/function
```

说明:

- doc: 显示 MATLAB 帮助窗口。
- doc function: 显示指定 MATLAB 功能函数的 HTML 帮助文档。
- doc toolbox/function: 显示指定工具箱中函数的 HTML 帮助文档。

(3) help: 显示 MATLAB 命令和 M 文件的在线帮助

语法:

```
help topic
```

说明:

help topic: 给出指定主题的帮助。