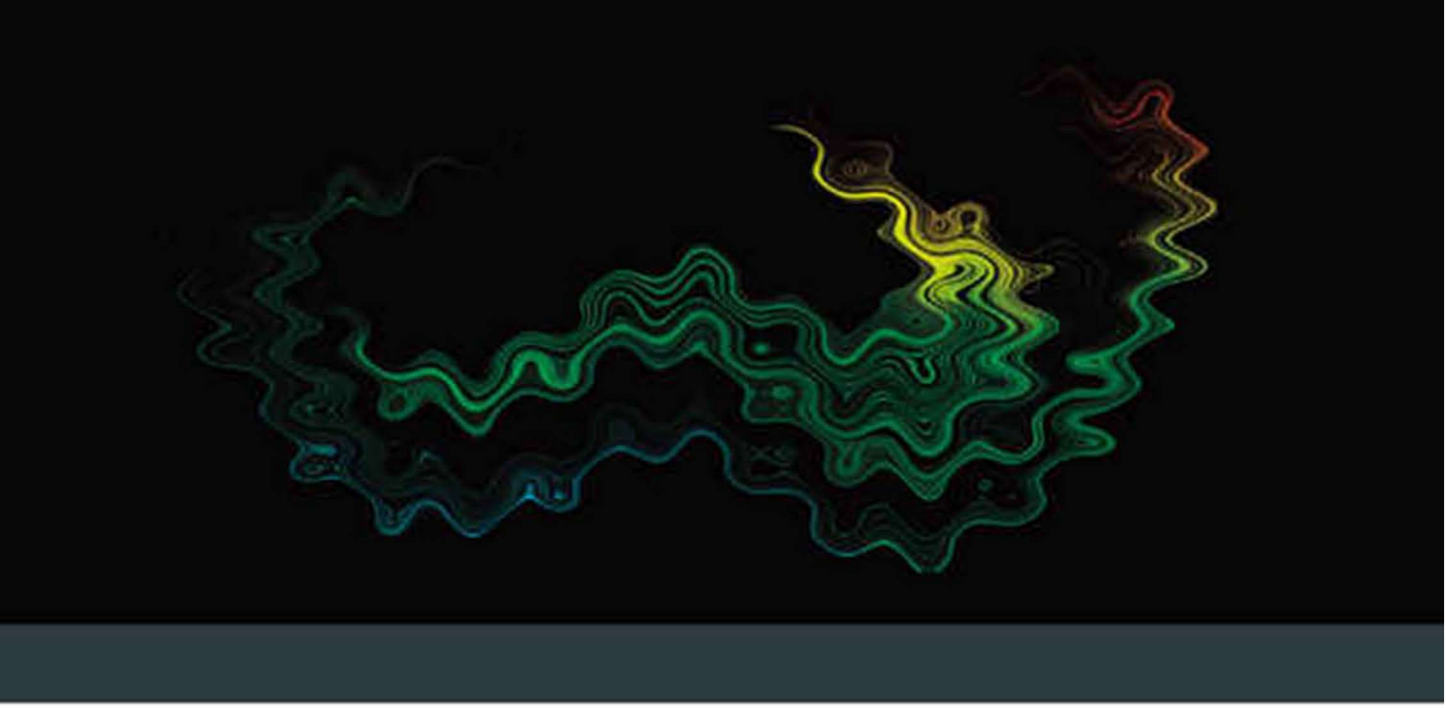

MATLAB Foundation and
Its Applications in Robotics

MATLAB基础与机器人学应用

石 青　王化平　吴 阳 编著

北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

需要全本请访问 www.ertongbook.com

MATLAB 基础与机器人学应用

石 青 王化平 吴 阳 编著



北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书是关于 MATLAB 基本应用和机器人学的实用参考书，全书共 7 章，以当前比较流行的 MATLAB 2018 版本为基础，阐述 MATLAB 的主要功能及机器人学基本应用。本书主要内容有：MATLAB 简介及运算规则，包括 MATLAB 用户界面、帮助系统、矩阵运算、数值运算及符号运算等；MATLAB 常见功能，包括 MATLAB 程序设计、数据插值与拟合、数值微积分、常微分方程求解及 MATLAB 绘图等；MATLAB 机器人工具箱，以机械臂为例详细介绍了机器人运动学与动力学建模及仿真；基于 MATLAB 的 Simulink 仿真，重点介绍机器人运动学与动力学建模及计算过程。

本书可用于高等院校机器人相关专业教材，并为机器人爱好者提供机器人学仿真的解决方案。

版权专有　侵权必究

图书在版编目（CIP）数据

MATLAB 基础与机器人学应用 / 石青，王化平，吴阳编著. —北京：北京理工大学出版社，2019. 12

ISBN 978 - 7 - 5682 - 8032 - 7

Ⅰ. ①M…　Ⅱ. ①石…　②王…　③吴…　Ⅲ. ①Matlab 软件 - 应用 - 机器人学 - 研究　Ⅳ. ①TP24

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2019）第 290773 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司
社　　址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号
邮　　编 / 100081
电　　话 / （010）68914775（总编室）
　　（010）82562903（教材售后服务热线）
　　（010）68948351（其他图书服务热线）
网　　址 / http：//www. bitpress. com. cn
经　　销 / 全国各地新华书店
印　　刷 / 三河市华骏印务包装有限公司
开　　本 / 787 毫米 × 1092 毫米　1/16
印　　张 / 13. 5　　责任编辑 / 孙　澍
字　　数 / 286 千字　　文案编辑 / 孙　澍
版　　次 / 2019 年 12 月第 1 版　2019 年 12 月第 1 次印刷　　责任校对 / 刘亚男
定　　价 / 58. 00 元　　责任印制 / 李志强

图书出现印装质量问题，请拨打售后服务热线，本社负责调换

PREFACE

前言

MATLAB 是美国 MathWorks 公司开发的一种多范式数值计算环境和专有编程语言，可进行矩阵计算、数据可视化、算法实现、交互式程序设计及非线性动态系统的建模和仿真等，广泛应用于工程计算、信号处理与通信、工程设计、图像处理等与数值计算相关的众多科学研究领域。机器人学又称为机器人技术或机器人工程学，主要研究机器人的控制与被处理物体之间的相互关系，涉及机械学、电子工程学、控制理论与控制工程学、计算机科学与工程等多学科领域的融合及交叉。21 世纪以来，机器人技术成为衡量一个国家科技水平与高端制造水平的重要标准，也是“中国制造 2025”的重点发展领域，是国家前沿科技和未来产业发展的核心力量。利用 MATLAB 强大的仿真工具和可视化特征，可简化机器人的复杂计算，易于机器人爱好者及初学者迅速了解和探索机器人学的奥秘。

本书是关于 MATLAB 基础和其在机器人学中的实用参考书，全书共 7 章，以当前比较流行的 MATLAB 2018 版本为基础，描述了 MATLAB 的主要功能及机器人学基本应用。第 1 章和第 2 章介绍了 MATLAB 简介及运算规则，包括 MATLAB 用户界面、帮助系统、矩阵运算、数值运算及符号运算等；第 3 ~ 5 章介绍了 MATLAB 的常见功能，包括 MATLAB 程序设计、数据插值与拟合、数值微积分、常微分方程求解及 MATLAB 绘图等；第 6 章利用 MATLAB 机器人工具箱，以机械臂为例详细介绍了机器人运动学与动力学建模及仿真；第 7 章基于 MATLAB 的 Simulink 仿真，介绍了机器人运动学与动力学建模及计算过程。

作者一直从事机器人及其仿真相关课程教学，所在团队的研究方向主要是仿生机器人、微纳机器人，在机器人技术前沿交叉及工程应用等领域进行了多年的研究，也积累了丰富的经验。本书的初衷是通过介绍 MATLAB 这一强大的工程计算软件的基础知识，并结合团队在机器人技术中的多年的实践研究，通过实例展现机器人学的 MATLAB 仿真，为广大的本科生、研究生及机器人爱好者提供一种机

器人学仿真的解决方案，使他们更能体会到科学计算工具应用于实际研究中的重要性。

本书主要由石青、王化平、吴阳编著。团队同事、博士生及硕士生参与了部分章节的资料整理工作，特别感谢侯尧珍、陈晨、胡豪俊、闫书睿等。本书的编写与出版得到国家重点研发计划政府间国际合作专项、国家自然科学基金等的资助，在此表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，编写时间仓促，书中难免存在疏漏及不妥之处，敬请广大读者和专家不吝批评指正。

作　者

需要全本请访问 www.ertongbook.com

目　录
CONTENTS

第 1 章　MATLAB 简介 …… 001
1.1　概述 …… 001
1.2　用户界面与基本操作 …… 002
1.2.1　功能界面 …… 002
1.2.2　命令行窗口 …… 003
1.2.3　帮助系统 …… 005
1.3　数据与变量基础 …… 008
1.3.1　基本数据类型 …… 008
1.3.2　变量命名 …… 009
1.3.3　变量赋值 …… 010
1.4　本章小结 …… 010
习题 …… 011
第 2 章　MATLAB 基本运算 …… 012
2.1　矩阵运算 …… 012
2.1.1　矩阵生成与访问 …… 012
2.1.2　矩阵基本运算 …… 017
2.1.3　矩阵函数 …… 021
2.2　数值运算 …… 023
2.2.1　基本数学函数 …… 023
2.2.2　多项式运算 …… 023
2.2.3　线性方程组求解 …… 030

2.3 符号运算 …… 031
2.3.1 创建符号对象 …… 032
2.3.2 符号对象运算 …… 033
2.3.3 符号微积分 …… 036
2.4 本章小结 …… 040
习题 …… 040
第 3 章 MATLAB 程序设计 …… 042
3.1 M 文件 …… 042
3.1.1 脚本 M 文件 …… 042
3.1.2 函数 M 文件 …… 043
3.1.3 内联函数 …… 050
3.2 数据的输入与输出 …… 051
3.2.1 用户输入提示命令 input …… 051
3.2.2 请求键盘输入命令 keyboard …… 052
3.2.3 屏幕输出语句 disp …… 054
3.2.4 其他相关命令 …… 055
3.3 程序控制结构 …… 057
3.3.1 顺序结构 …… 058
3.3.2 选择结构 …… 058
3.3.3 循环结构 …… 063
3.4 程序调试 …… 067
3.4.1 概述 …… 067
3.4.2 调试方法 …… 068
3.5 本章小结 …… 069
习题 …… 069
第 4 章 MATLAB 数据分析与处理 …… 070
4.1 数据插值与拟合 …… 070
4.1.1 数据插值 …… 070
4.1.2 数据拟合 …… 076
4.2 数值微积分 …… 077
4.2.1 数值微分 …… 077
4.2.2 数值积分 …… 078

4.3　零极点问题 …… 080
4.3.1　求零点 …… 080
4.3.2　求极值 …… 082
4.4　常微分方程的求解 …… 084
4.4.1　常微分方程的解析解 …… 084
4.4.2　常微分方程的数值解 …… 084
4.5　本章小结 …… 089
习题 …… 089
第5章　MATLAB 绘图 …… 091
5.1　二维绘图 …… 091
5.1.1　plot 命令 …… 091
5.1.2　fplot 命令 …… 098
5.1.3　ezplot 命令 …… 099
5.1.4　交互式绘图 …… 100
5.2　三维绘图 …… 103
5.2.1　plot3 命令 …… 103
5.2.2　mesh 命令 …… 104
5.2.3　surf 命令 …… 106
5.3　特殊图形 …… 108
5.3.1　二维特殊图形命令 …… 108
5.3.2　三维特殊图形命令 …… 111
5.4　三维图形的高级设置 …… 113
5.4.1　视点控制 …… 113
5.4.2　光照控制 …… 114
5.5　本章小结 …… 115
习题 …… 115
第6章　机器人工具箱建模与仿真 …… 117
6.1　机器人工具箱 …… 117
6.1.1　机器人工具箱简介 …… 117
6.1.2　机器人工具箱下载及安装 …… 117
6.2　机器人学基础 …… 118
6.2.1　刚体的位姿描述及坐标变换 …… 118

6.2.2 连杆描述及坐标系 …… 121
6.2.3 机器人运动学 …… 123
6.3 基本函数介绍 …… 123
6.3.1 Link 函数 …… 123
6.3.2 SerialLink 函数 …… 125
6.3.3 变换矩阵求解函数 …… 127
6.4 机器人运动学计算 …… 128
6.4.1 正运动学分析 …… 128
6.4.2 逆运动学分析 …… 132
6.4.3 雅可比矩阵 …… 137
6.4.4 轨迹规划 …… 138
6.5 机器人动力学计算 …… 141
6.5.1 动力学方程 …… 142
6.5.2 正动力学分析 …… 147
6.5.3 逆动力学分析 …… 150
6.6 机器人工具箱仿真实例 …… 151
6.6.1 任务描述 …… 152
6.6.2 运动模型构建 …… 153
6.6.3 轨迹规划和运动学计算 …… 154
6.6.4 动力学计算 …… 156
6.7 本章小结 …… 157
习题 …… 158
第 7 章 机器人学 Simulink 仿真 …… 160
7.1 Simulink 基本操作 …… 160
7.1.1 Simulink 的特点 …… 160
7.1.2 Simulink 启动与基础操作 …… 161
7.2 Simulink 模块库和系统仿真 …… 167
7.2.1 Simulink 模块库常用模块介绍 …… 167
7.2.2 Simulink 仿真系统设置 …… 172
7.3 子系统创建与封装 …… 174
7.3.1 通过子系统模块来建立子系统 …… 175
7.3.2 组合已有的模块建立子系统 …… 176

7.3.3　封装子系统 …… 177
7.3.4　条件子系统 …… 178
7.4　Simulink 机器人运动学计算 …… 182
7.4.1　正运动学分析 …… 183
7.4.2　逆运动学分析 …… 185
7.4.3　雅可比矩阵 …… 187
7.4.4　轨迹规划 …… 188
7.5　Simulink 机器人动力学计算 …… 190
7.5.1　正动力学分析 …… 190
7.5.2　逆动力学分析 …… 192
7.6　机械臂关节控制 …… 193
7.6.1　驱动电动机 …… 193
7.6.2　独立关节控制 …… 194
7.7　Simulink 仿真实例 …… 195
7.7.1　仿真任务描述 …… 195
7.7.2　轨迹函数生成 …… 197
7.7.3　仿真模型构建 …… 197
7.7.4　仿真结果分析 …… 200
7.8　本章小结 …… 202
习题 …… 202
参考文献 …… 204

第 1 章

MATLAB 简介

1.1 概述

MATLAB 是美国 MathWorks 公司开发的商业数学软件，是用于算法开发、数据可视化、数据分析及数值计算等方面的高级技术计算语言和交互式环境，主要包括 MATLAB 和 Simulink 两大部分。它是以矩阵为基础对象的系统计算平台，把计算、绘图及动态仿真等功能有机地融合在一起，可进行快速开发计算。MATLAB 在工程计算与数值分析、控制系统设计与仿真、信号处理、图像处理等学科领域都有着十分广泛的应用。在高等院校，MATLAB 已成为线性代数、自动控制理论、机器人学、动态系统仿真、图像处理等许多课程的基本教学工具，是大学生和研究生应该掌握的一种基本编程语言。

本书的目的是使读者能够运用 MATLAB 进行一般的工程计算，掌握 MATLAB 的基本技术（基本计算、矩阵处理、符号运算和图形显示技术等），同时，通过 MATLAB 在机器人学中的应用实例掌握机器人学相关的 MATLAB 解决方案，使读者能进一步体会到科学计算工具应用于实际研究的重要性，为将来从事工程技术方面的产品开发、科学研究、工程计算和管理等工作打下一定的基础。

本书的软件界面与程序用例均采用 MATLAB R2018b 版本，如图 1.1 所示。该版本是 MathWorks 官方开发的较新版本的商业数学软件，让用户不仅可以将自己的创意



（a）　　（b）

图 1.1　MATLAB 快捷图标与启动界面

（a）计算机桌面快捷图标；（b）MATLAB R2018b 启动界面

需要全本请访问 www.ertongbook.com

在桌面展示，还可以对大型数据集进行分析，并扩展到群集和云。另外，MATLAB 代码可以与其他语言集成，使用户能够在 Web、企业和生产系统中部署算法和应用程序。与 MATLAB 以往版本相比，MATLAB R2018b 拥有更多数据分析、机器学习和深度学习的相关选项，并且速度比以往更快，深度学习方面有更强大的功能，让用户可以构建自己的模型，并且能够更好地进行网络模型的训练和可视化等。此外，具有优化的 Simulink 智能编辑功能，可通过单击来创建新的模块端口，直接在图标上编辑模块参数；5G Toolbox 可以仿真、分析和测试 5G 通信系统的物理层。该版本适用于工程计算、控制设计、信号处理与通信、图像处理、信号检测、金融建模设计与分析等多个领域。

1.2 用户界面与基本操作

MATLAB 桌面如图 1.2 所示，主要有功能界面、命令行窗口、命令历史记录窗口、工作区窗口等。



图 1.2 MATLAB 桌面

1.2.1 功能界面

MATLAB 功能界面主要包括三大部分：“主页”“绘图”及“APP”，其中“主页”是功能界面中的主要工作界面。

“主页”标签如图 1.3 所示，包括基本管理功能，如搜索文件、建立一个新文件、打开一个已经存在的文件、输入数据、将数据存入工作空间或从工作空间清除数据等，以及打开 Simulink 工具箱、设置 MATLAB 环境、帮助和了解 MATLAB 等部分。其中菜单栏有一个“布局”按钮，用户可在该选项中选择在当前工作页面上所要显示的功能。该标签下还有一个“预设”按钮，用户可以自行定义数据长度、显示的紧凑度、日期及数据的显示格式与长度、矩阵的长度与宽度等，另外，还可以选择文档中语句的颜色。

“绘图”标签如图 1.4 所示，主要功能是绘图，包含各种绘图工具。用户不仅可以

给出变量直接绘图，而且对于需要创建系统方框图的复杂系统，只需将绘图指令直接加在方框图中即可仿真绘图。一般用户使用的绘图工具都是和系统建模相关。



图 1.3　主页标签

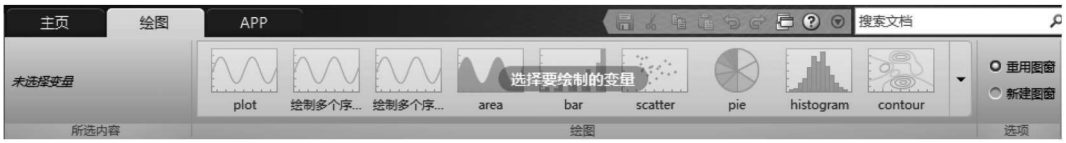

图 1.4　绘图标签

“APP”标签中包含多种工具箱，可以应用在许多方面，这些工具箱在用户安装 MATLAB 时均可以根据需求自行添加，也可以在后续自行添加。这些工具箱功能强大，应用广泛，如机器学习、深度学习、数学统计与优化、控制系统设计与分析、图像处理与计算机视觉等。

1.2.2　命令行窗口

命令行窗口通常用来执行 MATLAB 命令函数，实现多项任务，比如创建变量、回调 M 文件、数值计算、符号计算、绘制二维图形、绘制三维图形等。如果想再次执行已经运行过的语句，可以借助上下方向键进行选取，可以借助 Delete 键和 Backspace 键进行删除，然后按 Enter 键执行。

在命令行中可以输入变量、函数和数学表达式，按 Enter 键就能给出准确的结果；也可以输入用户自己编写的 M 文件，按 Enter 键开始执行。

1. 工作区

工作区罗列了 MATLAB 工作空间中存储的所有变量名称和变量值，或者运行函数中的所有变量名称和变量值。双击工作区中显示的任意变量，将会打开数组编辑器窗口显示该变量的数值，并且可以同时打开多个变量，还可以借助工作区中变量存储的数值进行绘图。

2. 命令历史记录窗口

在 MALTAB 默认桌面，命令历史记录窗口显示在右下角，如果未显示，可通过单击“主页”→“布局”→“命令历史记录”→“停靠”来添加命令历史记录窗口。

MATLAB 启动后，所有在命令行窗口执行的语句都会存储在命令历史记录中。如果需要重新运行某一命令行，可以双击命令历史记录中的相应语句来运行该语句行，并将该运行语句和运行结果显示在命令窗口。也可以选中想运行的命令，按住鼠标左键将其拖入命令行窗口，按 Enter 键即可，如需修改，也可以修改后再按 Enter 键运行。还可以将能实现特殊功能的多行语句选中，右击打开悬挂菜单，然后选择“创建脚本”

或者“创建实时脚本”，进而在命令行窗口输入 M 文件名称，从而运行选中的多行命令并给出结果。

3. 基本操作指令

（1）who 和 whos 指令

who 命令用来查看工作空间的所有变量名。

【例 1.1】 查看工作区变量及其具体信息。

```
>> a =[1 2 3;4 5 6;7 8 9];i =1;j =1;syms x;
>> who
您的变量为:
a  i  j  x
```

whos 命令可查看工作空间中变量名的具体信息：

```
>>whos
  Name      Size        Bytes  Class       Attributes
  a         3x3          72    double
  i         1x1          8     double
  j         1x1          8     double
  x         1x1          8     sym
```

【例 1.2】 whos 命令的具体使用。

查看 double 型变量信息：

```
>> a =1.5;
>> whos a    % 显示变量 a 的信息
  Name      Size           Bytes  Class    Attributes

  a         1x1             8     double
```

查看 char 型变量信息：

```
>> SL ='I am a good man';
>> whos SL    % 显示变量 SL 的信息
  Name      Size           Bytes  Class    Attributes

  SL        1x15            30    char
```

（2）exist 指令

如果用户想查询当前工作区是否存在一个变量，可以调用 exist 函数来完成。该函

数的调用格式如下：

```
>> i = exist('A')
```

其中，A 为要查询的变量名。

返回值 i 表示 A 存在的形式：

➢ $i=0$：表示 A 不存在；

➢ $i=2$：表示在当前工作空间中存在一个名为 A 的变量；

➢ $i=2\sim8$：给出了变量作为文件、函数等的各种信息。

还可以利用 help 指令查询，键入“help exist”即可。如果 A 是一个变量、数组或矩阵，则也可以直接键入“A”。如果该变量存在，则显示其内容；如果该变量不存在，则给出该变量不存在的信息。

（3）clear 和 clc 指令

用户可以调用 clear 指令来删除一些不再使用的变量，从而使整个工作区更简洁。例如，指令“clear x1 y1”将删除 x_1 和 y_1 变量。此处应注意，这一命令中 x_1 与 y_1 中之间不能加逗号，否则该命令就会被错误地解释成将 y_1 的内容显示出来，从而 y_1 变量未被删除。

```
>> clear a,i
i =
     1
```

如果用户想删除整个工作区中所有的变量，则可以使用 clear 命令，在该命令后面不用加任何参数即可达到删除工作区所有变量的目的。但应当特别注意，一旦使用 clear 命令，MATLAB 工作区中的全部变量将被无条件删除。系统不会要求确认这个命令，所有变量都将被直接清除且不能恢复。

一般来说，如果需要运行一个较为复杂的文件，在文件开头最好利用 clear 命令清空工作区，否则可能会有以前遗留的一些变量与用户先前定义的变量产生冲突，从而影响计算结果。

clc 命令用于清除命令行窗口中的所有指令和结果。

1.2.3　帮助系统

MATLAB 提供了大量的函数和命令，要记忆全部函数和命令的使用方法是不现实的，可行的办法是先掌握一些基本内容，然后在实践中不断地总结和积累，逐步掌握其他内容。另外，通过软件系统本身提供的帮助功能来学习 MATLAB 的使用也是重要的方法。MATLAB R2018b 提供了丰富的帮助功能，通过这些功能可以很方便地获得有关函数和命令的使用方法。

MATLAB 帮助界面相当于一个帮助信息浏览器，使用帮助界面可以搜索和查看所有 MATLAB 的帮助文档，还能运行相关演示程序。一般可以通过以下 3 种方法进入

MATLAB 帮助界面：

➢ 单击 MATLAB 主窗口工具栏中的“帮助”按钮；

➢ 单击“帮助”菜单栏中前两项中的任何一项；

➢ 在命令行窗口中执行 helpwin 命令或 doc 命令。

MATLAB 的帮助界面如图 1.5 所示，该窗口包括左边的帮助向导目录和右边的帮助显示界面两部分。其中帮助向导目录包括所要查询的内容标题，可根据菜单栏中的不同帮助内容进行查询，如示例、函数和模块等。



图 1.5　帮助界面

【例 1.3】　helpwin 命令使用示例。

```
% 键入 helpwin 命令
 >> helpwin
matlab\datafun          - Data analysis and Fourier transforms.
matlab\datatypes            - Data types and structures.
matlab\elfun                 - Elementary math functions.
…
matlab\strfun               - Character arrays and strings.
matlab\timefun               - Time and dates.
matlab\validators              - (没有目录文件)
matlab\demos                - Examples.
```

```
matlab\graph2d                  -Two dimensional graphs.
matlab\graph3d                  -Three dimensional graphs.
matlab\graphics                  -Handle Graphics.
graphics\obsolete                -(没有目录文件)
...
webservices\restful              -(没有目录文件)
interfaces\webservices          -MATLAB Web Services Interfaces.
```

MATLAB 的指令繁多，为了帮助用户找到命令，MATLAB 通过其在线帮助功能来提供帮助。这些功能有三种形式：help 命令、lookfor 命令及交互使用的 help 菜单条。

1. help 命令

help 命令是查询函数用法的最基本方法，查询信息直接显示在命令窗口中。在命令窗口中直接输入“help”，MATLAB 将列出所有的帮助主题，每个帮助主题对应 MATLAB 搜索路径中的一个目录。

- help 后加帮助主题，可获得指定帮助主题的帮助信息；
- help 后加函数名，可得到指定函数的含义、用法等信息；
- help 后加命令名，将得到指定命令的用法。

【例 1.4】　利用 help 函数查看 sqrt 函数的具体信息。

```
>> help sqrt
```

此 MATLAB 函数返回数组 X 的每个元素的平方根。

对于 X 的负元素或复数元素，sqrt(X) 生成复数结果。

```
B = sqrt(X)
```

另请参阅 nthroot，realsqrt，sqrtmsqrt 的参考页中名为 sqrt 的其他函数。

2. lookfor 命令

lookfor 命令可以根据关键词来提供帮助。用户给出需要查询的关键词，MATLAB 自行搜索所有 MATLAB 帮助标题，以及 MATLAB 搜索路径中 M 文件的第一行，返回结果包含所指定关键词的所有项。用户还可以只给出关键词，不必是 MATLAB 命令。

【例 1.5】　lookfor 指令查看 fourier 相关函数。

```
>> lookfor fourier
```

命令行窗口输出如图 1.6 所示。

需要全本请访问 www.ertongbook.com