

机械工程前沿著作系列 HEP  
HEP Series in Mechanical Engineering Frontiers MEF

# 基于 MATLAB 的机械故障 诊断技术案例教程

Case Study of Mechanical Fault Diagnosis  
Technology Based on MATLAB

张玲玲 肖静 编著  
肖云魁 主审

高等教育出版社

机械工程前沿著作系列 HEP  
HEP Series in Mechanical Engineering Frontiers MEF

# 基于 MATLAB 的机械故障 诊断技术案例教程

Case Study of Mechanical Fault Diagnosis  
Technology Based on MATLAB

张玲玲 肖静 编著  
肖云魁 主审

JIYU MATLAB DE JIXIE  
GUZHANG ZHENDUAN  
JISHU ANLI JIAOCHENG

高等教育出版社·北京

## 内容简介

本书以 MATLAB 为学习工具和手段, 将机械故障诊断中信号处理(特征提取)、模式识别的关键技术与工程应用有效结合, 共分为基础篇、信号处理篇和模式识别篇 3 篇内容。其中, 第一篇为 MATLAB 简介, 便于读者掌握 MATLAB 的基本用法; 后两篇按照先介绍基本理论, 再列出相关的 MATLAB 函数, 最后结合车辆故障诊断案例的顺序, 采用 MATLAB 编程实现的架构进行讲述, 使读者能够有效掌握目前机械故障诊断领域先进实用的信号处理和模式识别方法。

本书可作为高等院校机械工程、载运工具运用工程等学科的研究生、本科生的教材或参考书, 对信号处理相关领域的科研人员亦有较大的参考价值。

## 图书在版编目(CIP)数据

基于 MATLAB 的机械故障诊断技术案例教程 / 张玲玲, 肖静编著. -- 北京: 高等教育出版社, 2016.11  
(机械工程前沿著作系列)  
ISBN 978-7-04-046394-1

I. ①基… II. ①张… ②肖… III. ① Matlab 软件 - 应用 - 机械设备 - 故障诊断 - 高等学校 - 教材 IV. ① TH17-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 206256 号

策划编辑 刘占伟      责任编辑 刘占伟      特约编辑 陈 静      封面设计 杨立新  
插图绘制 杜晓丹      版式设计 张 杰      责任校对 王 雨      责任印制 韩 刚

出版发行	高等教育出版社	网 址	<a href="http://www.hep.edu.cn">http://www.hep.edu.cn</a>
社 址	北京市西城区德外大街 4 号		<a href="http://www.hep.com.cn">http://www.hep.com.cn</a>
邮政编码	100120	网上订购	<a href="http://www.hepmall.com.cn">http://www.hepmall.com.cn</a>
印 刷	涿州市星河印刷有限公司		<a href="http://www.hepmall.com">http://www.hepmall.com</a>
开 本	787mm × 1092mm 1/16		<a href="http://www.hepmall.cn">http://www.hepmall.cn</a>
印 张	20	版 次	2016 年 11 月第 1 版
字 数	400 千字	印 次	2016 年 11 月第 1 次印刷
购书热线	010-58581118	定 价	79.00 元
咨询电话	400-810-0598		

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 请到所购图书销售部门联系调换  
版权所有 侵权必究  
物 料 号 46394-00

# 前言

设备故障诊断技术以故障机理和检测技术为基础,以信号处理和模式识别为基本方法,并随着计算机及通信技术的发展而迅速发展。按照工作过程来讲,故障诊断技术的研究内容可以归结为4方面:信号采集、特征提取、状态识别和预报决策技术,其中特征提取和状态识别是对测试信号进行必要的分析和处理,得到被测对象的特征信息,并作为进一步诊断推理和判别故障的依据。因此,测试信号的特征提取和模式识别是故障诊断的核心技术,将影响到诊断结果的可靠性和有效性。

MATLAB 作为当今世界上应用最为广泛的高性能计算和可视化软件,不仅具有非常强大的科学计算、数值分析、图形显示、系统分析和建模等功能,还具备运算结果和编程可视一体化功能及较高的编程效率,是科学研究和工程设计领域中不可缺少的应用软件。

但是,目前图书市场上还没有一本可以将机械设备故障诊断关键技术和 MATLAB 有效结合起来并用于工程实践的参考书,作为机械工程专业的人员,笔者在这方面深有体会。为了基本掌握和应用故障诊断关键技术,至少需要参考3方面的图书,其中包括 MATLAB 的基本使用方法和总体功能方面的、MATLAB 在数字信号处理中的应用方面的以及 MATLAB 在模式识别中的应用方面的。即使购买到这些书籍,往往并不是专门针对机械设备故障诊断来讲述的,造成这些书籍的实际利用率并不高。

基于上述考虑,本书将全书分为3篇,第一篇为基础篇,主要介绍 MATLAB 的基本操作、编程方法和实用技巧。第二篇为信号处理篇,分6章来介绍,其中,第2章为信号处理分析基础,主要介绍信号的分类、产生和采集,信号时域和频域常见的分析方法;第3章为时频分析方法的 MATLAB 实现及应用研究,主要介绍短时 Fourier 变换、Gabor 变换和 Wigner-Ville 时频分布的基本理论和在机械故障诊断中的应用;第4章为小波分析的 MATLAB 实现及应用研究,简要介绍了小波分析的基本理论和基于小波降噪预处理、小波频带累加方法以及小波包-AR 谱方法的故障诊断实例;第5章为 Hilbert-Huang 变换的 MATLAB 实现及应用研究,主要介绍 Hilbert-Huang 变换的基本理论和基于 EMD-AR 谱、EMD-包络谱、EMD 预处理的伪 WVD 时频分布以及 EMD-SVD 变换方法的应用实例;第6章为分数阶 Fourier 变换的 MATLAB 实现及应用研究,主要介绍分数阶 Fourier 变换的基本理论和基于分数阶滤波的变速器故障诊断实例;第7章为图像处理技术的 MATLAB 实现及应用研究,主要介绍图像处理的基本理论和基于对称极坐标图

像的生成方法、基于灰度共生矩阵的方法提取振动图像特征的应用实例。第三篇为模式识别篇,分为5章来介绍,第8~12章分别简述了人工神经网络、模糊理论、遗传算法、粒子群算法以及支持向量机方法的基本原理,并通过相应的机械故障诊断实例展示了理论应用。

本书在编写过程中得到了军事交通学院肖云魁教授及其领导的研究团队的大力支持和帮助,王国威、肖静、任金成编写了第一篇内容,张玲玲、梅检民、张晓倩、李志勇、张海峰编写了第二篇内容,常春、曾锐利、吴春志编写了第三篇内容。太原卫星发射中心技术部的张晓倩为本书的统稿人,贾继德、沈虹做了大量的辅助工作。同时,本书也吸收了国内外同行研究成果的精华,在此对相关作者一并表示深深的谢意。

由于编写时间仓促以及作者研究水平有限,书中难免有错误和疏漏之处,恳请各位专家和广大读者批评指正。

为了便于读者学习,本书提供了随书光盘,包含各章相应的 MATLAB 源代码程序以及诊断实例所涉及的数据文件。

编著者

2016年4月

# 目录

## 第一篇 基础篇

第 1 章 认识 MATLAB	3
1.1 MATLAB 简介	3
1.1.1 MATLAB 概述	3
1.1.2 MATLAB 的功能特点	4
1.2 MATLAB 的用户界面	5
1.3 MATLAB 矩阵运算	13
1.3.1 MATLAB 中的变量	13
1.3.2 基本矩阵的操作	14
1.3.3 稀疏矩阵	18
1.3.4 矩阵的运算	19
1.4 MATLAB 的编程基础	24
1.4.1 编程概述	24
1.4.2 流程控制	25
1.4.3 脚本文件	31
1.4.4 函数文件	33
1.4.5 M 文件调试	44
1.5 MATLAB 绘图及实用技巧	48
1.5.1 绘图	48
1.5.2 实用技巧	66

## 第二篇 信号处理篇

第 2 章 信号处理分析基础	71
2.1 信号的分类和采样定理	71

2.2	常用信号的产生	72
2.2.1	基本信号的产生	72
2.2.2	仿真信号的生成	79
2.3	实际信号的采集	83
2.3.1	数据采集系统设计的基本原则与一般步骤	83
2.3.2	柴油发动机非稳态振动信号采集系统	84
2.4	信号的基本分析方法	87
2.4.1	信号的时域分析	87
2.4.2	信号的频域分析	94
<b>第 3 章</b>	<b>时频分析方法的 MATLAB 实现及应用研究</b>	<b>103</b>
3.1	短时 Fourier 变换的 MATLAB 实现	103
3.1.1	短时 Fourier 变换基本原理	103
3.1.2	短时 Fourier 变换的 MATLAB 函数及举例	105
3.2	Gabor 变换的 MATLAB 实现	110
3.2.1	Gabor 变换	110
3.2.2	Gabor 变换的 MATLAB 函数及举例	111
3.3	Wigner-Ville 时频分布的 MATLAB 实现	113
3.3.1	Wigner-Ville 时频分布	113
3.3.2	Wigner-Ville 时频分布的 MATLAB 函数及举例	114
3.4	时频分布在机械故障诊断中的应用实例	116
<b>第 4 章</b>	<b>小波分析的 MATLAB 实现及应用研究</b>	<b>119</b>
4.1	小波分析的基本理论	119
4.1.1	连续小波变换	119
4.1.2	离散小波变换	120
4.1.3	多分辨率分析	121
4.1.4	小波包分析	122
4.2	小波分析的主要函数介绍	123
4.2.1	一维连续小波变换	123
4.2.2	一维离散小波变换	126
4.2.3	小波包变换	132
4.2.4	信号的小波消噪	137
4.3	小波分析在机械故障诊断中的应用实例	140
4.3.1	基于小波降噪预处理的时频分布诊断柴油机断油故障	140



4.3.2	小波频带能量累加法分析柴油机气门磨损故障	143
4.3.3	小波包-AR 谱分析变速器轴承故障	146
<b>第 5 章 Hilbert-Huang 变换的 MATLAB 实现及应用研究</b>		<b>151</b>
5.1	Hilbert-Huang 变换的基本理论	151
5.1.1	固有模态函数 (IMF)	151
5.1.2	EMD 原理	151
5.1.3	Hilbert 谱与 Hilbert 边际谱	153
5.1.4	EMD 的局限性	154
5.2	Hilbert-Huang 变换的 MATLAB 主要函数及实现	155
5.2.1	Hilbert-Huang 变换主要函数	155
5.2.2	Hilbert-Huang 变换仿真实例	156
5.3	Hilbert-Huang 变换在机械故障诊断中的应用实例	164
5.3.1	EMD-AR 谱提取柴油机活塞、活塞销故障特征	164
5.3.2	EMD-包络谱变速器故障诊断	168
5.3.3	基于 EMD 预处理的伪 WVD 时频分布提取信号特征	171
5.3.4	基于 EMD-SVD 变换的柴油机曲轴轴承故障特征提取	175
<b>第 6 章 分数阶 Fourier 变换的 MATLAB 实现及应用研究</b>		<b>181</b>
6.1	分数阶 Fourier 变换的基本理论	181
6.2	分数阶 Fourier 变换的特点	182
6.3	分数阶 Fourier 变换的应用	182
6.4	分数阶 Fourier 变换的基本理论	183
6.4.1	基本定义	183
6.4.2	主要性质	185
6.5	分数阶滤波的 MATLAB 函数实现	186
6.5.1	FRFT 自适应滤波原理	186
6.5.2	FRFT 自适应滤波阶次确定	187
6.5.3	FRFT 自适应滤波的 MATLAB 实现	189
6.6	基于分数阶滤波的应用实例	190
6.6.1	实验台设置	190
6.6.2	机械故障诊断实例	190



<b>第 7 章 图像处理技术的 MATLAB 实现及应用研究</b> . . . . .	<b>195</b>
7.1 图像处理的基本知识 . . . . .	195
7.1.1 图像类别与数据格式 . . . . .	195
7.1.2 图像读入、显示和保存的 MATLAB 实现 . . . . .	197
7.1.3 图像格式转换的 MATLAB 实现 . . . . .	198
7.1.4 常用图像处理方法的 MATLAB 实现 . . . . .	199
7.2 基于对称极坐标图像的生成方法 . . . . .	201
7.2.1 基于对称极坐标图像的生成 . . . . .	201
7.2.2 对称极坐标方法参数的选择 . . . . .	202
7.2.3 基于对称极坐标方法的振动信号图像的生成 . . . . .	204
7.3 基于灰度共生矩阵的方法提取振动图像特征 . . . . .	207
7.3.1 灰度图像生成方法 . . . . .	208
7.3.2 灰度共生矩阵及特征参数 . . . . .	208
7.3.3 振动信号灰度图像的特征提取代码实现 . . . . .	210

### 第三篇 模式识别篇

<b>第 8 章 人工神经网络的 MATLAB 实现及应用研究</b> . . . . .	<b>215</b>
8.1 神经网络的基本概念 . . . . .	215
8.1.1 人工神经元 . . . . .	215
8.1.2 传递函数 . . . . .	215
8.1.3 神经网络的分类和特点 . . . . .	216
8.2 BP 神经网络 . . . . .	217
8.2.1 BP 神经网络算法简介 . . . . .	217
8.2.2 BP 神经网络的 MATLAB 函数 . . . . .	218
8.2.3 BP 神经网络在机械故障诊断中的应用 . . . . .	219
8.3 径向基函数神经网络 . . . . .	222
8.3.1 径向基函数神经网络算法简介 . . . . .	222
8.3.2 径向基函数神经网络的 MATLAB 函数 . . . . .	223
8.3.3 径向基函数神经网络在机械故障诊断中的应用 . . . . .	225
<b>第 9 章 模糊理论的 MATLAB 实现及应用研究</b> . . . . .	<b>227</b>
9.1 模糊理论基础 . . . . .	227
9.1.1 模糊集合 . . . . .	227

9.1.2	模糊关系	230
9.1.3	模糊变换与模糊综合评判	231
9.1.4	If...then 规则	231
9.1.5	模糊推理	232
9.2	模糊聚类分析	232
9.2.1	模糊聚类基本概念	232
9.2.2	模糊聚类分析的 MATLAB 实现	234
9.2.3	模糊聚类分析在机械故障诊断中的应用	238
9.3	模糊神经网络	239
9.3.1	模糊神经网络的 MATLAB 实现	241
9.3.2	模糊神经网络在机械故障诊断中的应用	243
<b>第 10 章 遗传算法的 MATLAB 实现及应用研究</b>		<b>251</b>
10.1	遗传算法简介	251
10.1.1	遗传算法的基本原理	251
10.1.2	遗传算法分析	252
10.2	遗传算法的 MATLAB 实现	253
10.2.1	编码	253
10.2.2	解码	254
10.2.3	选择	254
10.2.4	交叉	255
10.2.5	变异	256
10.3	遗传算法在机械故障诊断中的应用	256
10.3.1	诊断问题的数学描述	256
10.3.2	遗传算法在机械故障诊断中的应用实例	256
<b>第 11 章 粒子群算法的 MATLAB 实现及应用研究</b>		<b>265</b>
11.1	粒子群算法的基本原理	265
11.2	粒子群算法在机械故障诊断中的应用	268
11.2.1	基于改进 PSO 的 BP 混合算法	268
11.2.2	粒子群算法在机械故障诊断中的应用实例	269
<b>第 12 章 支持向量机的 MATLAB 实现及应用研究</b>		<b>275</b>
12.1	支持向量机	275
12.1.1	统计学习理论	275

12.1.2 最优分类面	277
12.1.3 支持向量机模型	278
12.2 支持向量机的 MATLAB 实现	280
12.2.1 支持向量分类的相关函数	280
12.2.2 支持向量回归的相关函数	281
12.2.3 SVM 工具箱中的其他函数	281
12.2.4 数据的导入方法	281
12.2.5 SVM 工具箱的应用实例	282
12.3 支持向量机在机械故障诊断中的应用	283
参考文献	289

第一篇

基础篇



# 第 1 章 认识 MATLAB

## 1.1 MATLAB 简介

MATLAB (Matrix Laboratory, 矩阵实验室) 是美国 MathWorks 公司推出的一种面向工程和科学计算的交互式计算软件。它以矩阵运算为基础, 把计算、可视化、程序设计融合在一个简单易用的交互式工作环境中, 是一款数据分析和处理功能都非常强大的工程实用软件。

MATLAB 语言是一种“数学形式的语言”, 它的操作和功能函数指令就是用计算机和数学书常用的英文单词和符号来表达的, 比 BASIC、FORTRAN 和 C 等语言更接近于人们书写的数学计算公式, 更接近于人们进行科学计算的思维方式, 用 MATLAB 语言编写程序犹如在演算纸上排列公式与求解问题, 故有人称 MATLAB 编程语言为“演算纸”式科学算法语言。MATLAB 语言简单自然, 学习和使用更为容易, 能够更快地解决技术计算问题。

### 1.1.1 MATLAB 概述

MATLAB 可以进行矩阵运算、绘制函数和数据、实现算法、创建用户界面、连接其他编程语言的程序等, 主要应用于工程计算、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领域。

20 世纪 70 年代, 美国新墨西哥大学计算机科学系主任 Cleve Moler 教授出于减轻学生编程负担的动机, 为学生设计了一组调用 LINPACK 和 EISPACK 库程序的“通俗易懂”的接口, 此即用 FORTRAN 编写的萌芽状态的 MATLAB。然后由 Little、Moler、Steve Bangert 合作, 于 1984 年成立了 MathWorks 公司, 并把 MATLAB 正式推向市场。进入 20 世纪 90 年代, MATLAB 已经成为国际控制界公认的标准计算软件。

按照 MATLAB 版本的发布历史来看, 从 2006 年开始, MathWorks 公司每年

都在 3 月和 9 月对 MATLAB 进行两次更新, 并把相应的版本编号以相应的年份作为标记。因此我们可以非常方便地知道自己使用的 MATLAB 是何时发布的版本, 这无疑对了解相应的版本更新信息非常有帮助。

在 MATLAB R2006a 中, 主要更新了 10 个产品模块, 增加了多达 350 个新特性, 增加了对 64 位 Windows 的支持, 并新推出了 .net 工具箱。2007 年 3 月 1 日, MATLAB R2007a 发布, R2007a 版新增了两个新产品、82 个产品更新及 bug fix 等。除此之外, R2007a 可支持安装英特尔 (Intel) 处理器的 Mac 平台、Windows Vista, 以及 64 位的 Sun Solaris SPARC 等操作系统。2008 年 9 月, MATLAB R2008b 发布, 在此版本中, MATLAB 的桌面系统等有了较大的改变, 例如增加了 Function Browser, 还增加了 Map Containers 数据类型。2009 年 3 月 6 日, MATLAB R2009a 发布, 该版本包括了 MATLAB 和 Simulink 的若干新功能, 并包括两款新产品, 还对其他 91 款产品进行了更新和缺陷修复。自 R2008a 起, MATLAB 和 Simulink 产品系列需要进行激活, R2009a 增强了许可中心功能, 许可中心是用于管理许可证以及用户信息的一个在线工具。2010 年 3 月, MATLAB R2010a 发布, 该版本增加了更多多线程数学函数, 增强了文件共享、路径管理功能以及改进了 MATLAB 桌面等新的特性, 上述的这些特性比较符合初学者使用和学习, 所以笔者强烈推荐使用新的版本。

### 1.1.2 MATLAB 的功能特点

相对于其他传统的科技编程语言, MATLAB 主要有以下几个特点:

(1) 简洁紧凑的语言。MATLAB 程序书写形式自由灵活, 库函数极其丰富。由于库函数都由本领域的专家编写, 所以函数具有很高的可靠性, 用户可放心使用。

(2) 强大的数值运算功能。MATLAB 带有一个极大的预定义函数库, 其中提供了大量的数学、统计、最优化及工程方面的函数, 这些函数使用起来简单、易懂, 编程者也可以结合这些函数编写出自己所需要的各类函数, 从而实现解决复杂问题的目的。

(3) 强大的图像处理功能。MATLAB 具有方便的数据可视化功能, 以将向量和矩阵用图形表现出来, 并且可以对图形进行标注和打印。高层次的作图包括二维和三维的可视化、图像处理、动画和表达式作图, 可用于科学计算和工程绘图。

(4) 高级而简单的程序环境。MATLAB 不仅具有结构化的控制语句, 又有面向对象的编程特性。利用 MATLAB 编程非常简单, 变量的定义、使用及输入、输出也较为容易, 语法限制不严格, 可移植性好。

(5) 丰富的工具箱与模块集。MATLAB 包含两个部分, 即核心部分和各种可选的工具箱。核心部分有数百个核心内部函数。MATLAB 的工具箱不仅具有大量的数学优化函数, 同时还有许多特殊的应用领域所需的函数供编程者使用。其工具箱可分为两类, 即功能性工具箱和学科性工具箱。功能性工具箱主要用来扩充其符号计算功能、图形建模仿真功能、文字处理功能以及与硬件实时交互的功能。学科性



工具箱则应用于不同的学科,专业性和针对性更强。

(6) 开放性的源程序。除了内部函数外,所有 MATLAB 的核心文件和工具箱文件都是可读可改的源文件,用户可以通过对源文件的修改及加入自己的文件构成新的工具箱。

虽然 MATLAB 具有以上多种优点,但不可否认其缺点还是存在的:

(1) 与其他编译型语言程序相比, MATLAB 程序的执行速度要慢得多。由于 MATLAB 的程序不用编译等处理,也不生成可执行文件,程序要解释执行,所以速度很慢。这个问题可以通过合理的 MATLAB 结构得到缓解,也可以在使用前编译出 MATLAB 程序。

(2) MATLAB 软件的费用较高,但是 MATLAB 在科技编程方面能够节省大量的时间,故 MATLAB 在商业编程过程中是节省成本的。

下面介绍 MATLAB R2010a 版本的新功能。

MATLAB 产品系列的新功能包括:

(1) 新增了在 MATLAB 中进行流处理的系统对象,并在 Video and Image Processing Blockset 和 Signal Processing Blockset 中提供了 140 多种支持算法。

(2) 针对 50 多个函数提供多核支持并增强性能,并对图像处理工具箱中的大型图像提供更多支持。

(3) 在全局优化工具箱和优化工具箱中提供了新的非线性求解器。

(4) 能够从 Symbolic Math Toolbox 中生成 Simscape 语言方程。

(5) 在 SimBiology 中提供了随机近似最大期望 (SAEM) 算法和药动学给药方案支持。

Simulink 产品系列的新功能包括以下几点:

(1) 在 Simulink 中提供可调参数结构、触发模型块以及用于大型建模的函数调用分支。

(2) 在嵌入式 IDE 链接和目标支持包中提供了针对 Eclipse、嵌入式 Linux 及 ARM 处理器的代码生成支持。

(3) 在 IEC 认证工具包中提供了对 Real-Time Workshop Embedded Coder 和 PolySpace 产品的 ISO 26262 认证。

(4) 在 DO 鉴定工具包中提供了扩展至模型的 DO-178B 鉴定支持。

(5) Simulink PLC Coder, 用于生成 PLC 和 PAC IEC 61131 结构化文本的新产品。

## 1.2 MATLAB 的用户界面

MATLAB 的用户界面主要由菜单、工具栏、命令行窗口、历史命令窗口、当前工作目录窗口、工作空间窗口组成,如图 1.1 所示。

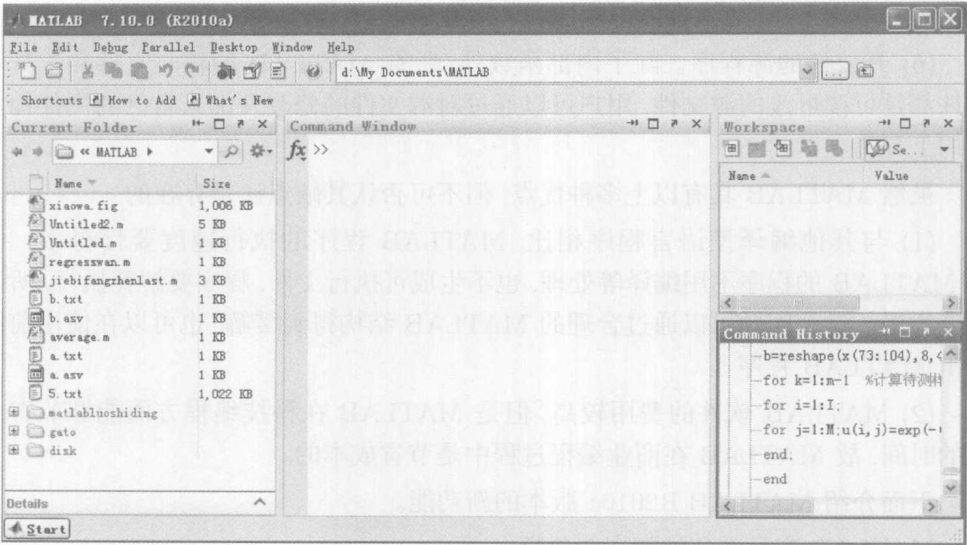


图 1.1 MATLAB 的用户界面

### 1. 菜单和工具栏

MATLAB 的菜单和工具栏界面与 Windows 程序的类似, 读者只需稍加实践便可以掌握其功能和使用方法。

菜单的内容随着命令窗口中不同命令的执行而作出相应的改变。这里只简单介绍默认情况下的菜单和工具栏。

#### 1) File 菜单

主要用于对文件的操作, 除常用的命令外, 还有以下几个命令需要注意:

- (1) ImportData: 向工作空间导入数据。
- (2) SaveWorkspace: 将工作空间的变量存储在某一文件中。
- (3) Setpath: 打开搜索路径设置对话框 (如图 1.2 所示)。
- (4) Preferences: 打开环境设置对话框。

#### 2) Edit 菜单

主要用于复制、粘贴等操作, 与一般的 Windows 程序类似。

#### 3) Debug 菜单

用于设置程序的调试。

#### 4) Desktop 菜单

用于设置主窗口中需要打开的窗口。

#### 5) Windows 菜单

列出当前所有打开的窗口。

#### 6) Help 菜单

用于选择打开不同的帮助系统。当读者单击“Current Folder”窗口时, 使得该