

普通高等教育“十三五”规划教材

力学专业程序实践 (第2版)

——用MATLAB解决力学问题的方法与实例

Programming Practices in Mechanics (2nd Edition)
—Methods and Examples of Solving Mechanical Problems with MATLAB

聂建新 马沁巍 马少鹏 ◎ 编著



普通高等教育“十三五”规划教材

力学专业程序实践（第2版）

——用MATLAB解决力学问题的方法与实例

Programming Practices in Mechanics (2nd Edition)
—Methods and Examples of Solving Mechanical Problems with MATLAB

聂建新 马沁巍 马少鹏 ◎ 编著



内 容 简 介

本教材分为上下两篇，上篇针对力学数据处理的特点介绍了 MATLAB 最核心的内容，包括 MATLAB 编程、计算和绘图；下篇以项目的方式介绍了用 MATLAB 解决理论力学、弹性力学、计算力学，以及实验力学等学科典型问题的方法、思路及实例。

本教材可作为高等院校力学专业或航空航天、机械类专业本科生和研究生的参考教材，也可对相关专业的教师和研究人员进行参考。

版权专有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

力学专业程序实践：用 MATLAB 解决力学问题的方法与实例 / 聂建新，马沁巍，马少鹏编著. —2 版. —北京：北京理工大学出版社，2019.3

ISBN 978-7-5682-6823-3

I. ①力… II. ①聂… ②马… ③马… III. ①Matlab 软件-应用-力学-高等学校-教材 IV. ①O3-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 042605 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

字 数 / 317 千字

版 次 / 2019 年 3 月第 2 版 2019 年 3 月第 1 次印刷

定 价 / 39.00 元

责任编辑 / 王玲玲

文案编辑 / 王玲玲

责任校对 / 周瑞红

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

声明及致谢

(1) MATLAB[®]是 MathWorks[®]公司的注册商标，本教材中为书写和阅读方便，以 MATLAB 代替 MATLAB[®]。

(2) 学习和使用本教材时，推荐使用 MATLAB 2008 及以上版本。

(3) 为符合出版规范，教材中某些图形在用 MATLAB 绘制时，对其线型和标注字体字号等做了调整。为了不影响阅读，这些调整并未显示在教材的相关程序中。

(4) 教材中少数例子直接取自 MATLAB 的 Help 文件，在此对 MathWorks[®]表示感谢。

(5) 作者多年来从一些论坛中学到很多知识和技巧，也受到不少网友的帮助，在此一并致谢。这些论坛包括：

MathWorks[®]的用户中心：<http://www.mathworks.com/matlabcentral>

水木社区 mathtools 版：<http://www.newsmth.net/nForum/#!board/MathTools>

Ilovetmatlab 论坛：<http://www.ilovematlab.cn>

(6) 读者可通过网络从 <http://masp-group.org> 下载本教材中所有程序。

(7) 教材的出版和其中部分实例的研究工作得到国家自然科学基金（11172039）和地震动力学国家重点实验室基金（LED2011-B03）的支持，在此致以诚挚的谢意。

第2版前言

本书第1版于2013年出版。自出版以来，本书受到了广大教师和学生的欢迎，曾获得北京理工大学校级优秀教材一等奖。

为适应新时代发展的需要，我们根据多年的教学实践和兄弟院校的意见，对本书第1版做了适当的修订。本版增加了近年来兵器安全研究中的若干典型工程问题，也订正了第1版中少许错误。本书可作为高等学校力学、兵器、航空宇航等相关专业本科生和研究生程序设计、数据处理和工程实践等课程的教材，也可作为力学及相关专业科研人员的参考资料。

本书第2版保持了初版的结构体系，仍分为上下两篇。上篇为MATLAB使用初步，是基础知识部分，简要介绍MATLAB的基本操作和高级使用技巧，最主要的目的是让学生迅速上手，并且能够自我提高；下篇为典型力学问题程序实践，是专题部分，针对若干力学问题，详细讲解应用MATLAB解决这些工程实际问题的方法，让学生在解决问题的过程中学习程序设计语言，提高应用技巧。

本版由聂建新、马沁巍和马少鹏共同编著。研究生范文琦、周士潮等也参与了部分章节的编写工作。此外，本书中许多例子取材于众多研究生的课题研究，在此一并表示衷心感谢。

本书虽经修改，但由于编者水平有限，疏漏之处仍在所难免，敬请读者批评指正，使本书能够得到不断提高和完善。

编著者

前言

力学的研究和实际工程中所面对的“数据处理”包括理论分析、科学计算，也包括各种实验数据的分析和处理。在计算机技术飞速发展和个人电脑全面普及的今天，一个合格的力学专业毕业生应该很好地掌握，事实上也必须掌握如何用计算机程序完成上述几种数据处理，否则很可能在科研和实际工作中“寸步难行”。

对于力学专业的数据处理来说，MATLAB 是一门合适的语言。MATLAB 是一门比常规高级语言更易用易学的高级语言。如果精通 C 语言，则再学习 MATLAB 时，只需几小时就能用它进行编程。更为重要的是，MATLAB 附带强大的计算和绘图函数库，几乎所有的数值计算、绘图等功能都可以用封装好的函数实现。另外，MATLAB 附带多达几十个工具箱，每一个工具箱都包含一个专业领域的大量的有特别功能的数据处理和计算函数。在以上功能和特点的基础上，MATLAB 可以非常方便地用来处理一个实际力学问题中的数据。这样的语言容易引起学生的学习兴趣。如果教学中再采用项目式的教学模式，从解决具体力学问题的需求出发，边用边学，学以致用，学生会很快体会到 MATLAB 语言的用处和好处，进而激发学习程序的兴趣，提高其应用程序解决实际问题的能力。

出于上述考虑，我们在工程力学专业的教学中，基于 MATLAB 语言开设了程序实践课程。课程对编程语言的学习以用为主，以学为辅；以项目为驱动，让学生主动学习，大部分内容自己学习。课程在近几年的教学实践中取得了优异的教学效果。本教材是为配合这门课程而编写的参考资料，其中也包括几年来教学过程的一些体会。

教材分为两部分：第一部分是基础知识部分，简要地介绍了 MATLAB 最核心的内容，最主要的目的是让学生迅速上手，并且能够自我提高；第二部分是专题部分，针对若干个力学问题，详细讲解用 MATLAB 解决这些问题的细节，让学生从解决问题的过程中学习程序设计语言，提高应用技巧。

本教材由马少鹏统筹，马少鹏、聂建新和马沁巍共同编著。研究生王显、赵尔强、严冬、曹彦彦、张瑞楠、刘贺同等也参与了部分章节的编写工作。全国优秀教师、北京市教学名师水小平教授对全书进行了精心审定。成稿之初，清华大学金观昌教授仔细阅读了教材，并给出了很好的修订意见。此外，本书中许多例子取材于众多研究生的课题研究，在此一并表示衷心感谢。

本教材可作为高等学校力学专业及力学相关专业本科生和研究生程序设计及数据处理方面的教材，也可作为力学专业科研人员的参考资料。由于编者水平有限，书中疏漏之处难免，敬请读者批评指正。

编著者

目 录

上篇 MATLAB 使用初步

第 1 章	MATLAB 简介	3
1.1	MATLAB 的功能	3
1.1.1	“language”——MATLAB 是一种语言	3
1.1.2	“computing”——MATLAB 可以用来计算	4
1.1.3	“visualization”——MATLAB 是数据可视化工具	6
1.2	MATLAB 的体系	7
1.2.1	MATLAB 主体部分	7
1.2.2	MATLAB 工具箱	8
1.3	MATLAB 的特点	8
1.3.1	MATLAB 的优势	8
1.3.2	MATLAB 的劣势	11
第 2 章	MATLAB 快速入门	13
2.1	Help yourself	13
2.1.1	Help 浏览器	13
2.1.2	Help 命令	15
2.2	MATLAB 操作简述	16
2.2.1	MATLAB 界面	16
2.2.2	MATLAB Editor	21
第 3 章	MATLAB 编程	25
3.1	数据的表述	25
3.1.1	数据类型	25
3.1.2	数据结构	26
3.2	基本程序结构语法	33
3.2.1	程序构成	33
3.2.2	选择结构和循环结构的语法	35
3.3	输入/输出 (I/O) 方法	37
3.3.1	命令窗口区的输入和输出	37
3.3.2	MATLAB 变量的 I/O	37
3.3.3	文本文件的读写	37
3.3.4	二进制文件的读写	38
3.3.5	图像文件的读写	39



第4章 MATLAB 计算	40
4.1 线性代数	40
4.1.1 矩阵的基本运算	40
4.1.2 矩阵的特征参数	41
4.1.3 矩阵的分解及线性方程组求解	41
4.2 多项式及插值	41
4.2.1 多项式表示及运算	41
4.2.2 插值	41
4.3 数据分析及统计	42
4.3.1 基本数据统计	42
4.3.2 傅里叶分析	42
4.4 微积分	43
第5章 MATLAB 绘图	44
5.1 二维数据	44
5.1.1 plot 详解	45
5.1.2 实际操作中的一些重要问题	47
5.1.3 二维数据的其他表示方式	51
5.2 三维数据	52
5.2.1 三维曲面	52
5.2.2 二维等值线	53
5.3 四维数据	57
5.3.1 简单四维数据	57
5.3.2 切片	58
5.3.3 等势线与等势面	58
5.4 多维数据	60
5.5 MATLAB 绘图细节	60
5.5.1 图形说明	60
5.5.2 颜色问题	62
5.5.3 句柄图形——控制绘图的每一个细节	64
5.6 MATLAB 图形的输出	69
5.6.1 输出方式	70
5.6.2 要注意的几个问题	70
第6章 图形用户界面	75
6.1 GUI 初步	75
6.1.1 初识 GUI 编程	75
6.1.2 GUI 编程要素——控件、消息与回调函数	76
6.2 GUI 编程实例	79
6.2.1 问题描述	79

6.2.2 实现过程	80
6.2.3 功能增强	84

下篇 典型力学问题程序实践

第 7 章 求解傅科摆的运动轨迹	91
7.1 傅科摆的动力学方程	91
7.2 dsolve 求解常微分方程	92
第 8 章 求解滑动摆系统的运动形式	97
8.1 滑动摆的动力学方程	97
8.2 用 ode45 求解常微分方程	98
第 9 章 可视化一个弹性力学的解析解	102
9.1 对径受压圆盘的应力分布	102
9.2 应力分布的可视化过程	103
9.2.1 数据矩阵的生成	103
9.2.2 绘图中的细节考虑	103
9.2.3 可视化结果	104
9.3 动画显示加载过程的应力变化	106
9.3.1 动画制作的基本概念	106
9.3.2 两种生成 frame 的方式	107
9.3.3 对径受压圆盘加载过程的动画显示	110
第 10 章 编写一个简单的有限元程序	112
10.1 用有限元求解问题的思路和步骤	112
10.1.1 总体思路	112
10.1.2 求解步骤	113
10.2 用 MATLAB 编写简单有限元程序	116
10.2.1 流程	116
10.2.2 算例实现	116
第 11 章 用 PDE Toolbox 进行有限元计算	121
11.1 偏微分方程的基本概念	121
11.1.1 三类偏微分方程	121
11.1.2 偏微分方程的 3 种边界条件	121
11.2 PDE Toolbox 求解的基本过程	122
11.2.1 窗口操作界面简介	123
11.2.2 求解的基本步骤	124
11.3 实例——用 PDE Toolbox 求解平面应力问题	127
11.3.1 受均布载荷的悬臂梁问题	127
11.3.2 含中心圆孔矩形板的拉伸问题	129
11.4 PDE Toolbox 应用深入	133



11.4.1	复杂边界条件的设置和复杂载荷的施加	133
11.4.2	数据结果的输出与保存	134
第 12 章	后处理 Abaqus 的计算结果	138
12.1	商业有限元软件结果后处理的必要性	138
12.2	Abaqus 计算结果的后处理	139
12.2.1	问题描述	139
12.2.2	操作过程	139
第 13 章	处理和绘制拉伸实验的数据	146
13.1	拉伸实验数据处理概述	146
13.2	低碳钢拉伸实验数据处理及绘制	147
13.2.1	目标及要求	147
13.2.2	具体实现过程	147
第 14 章	实现一个光学引伸计	152
14.1	光学引伸计	152
14.1.1	引伸计及光学引伸计	152
14.1.2	光学引伸计的实现流程	153
14.2	图像采集的实现	154
14.2.1	MATLAB 图像采集工具箱	154
14.2.2	用 MATLAB 采集实验图像实例	161
14.3	含标记点图像的处理	164
14.3.1	处理图像得到应变数据	165
14.3.2	实际测量中需要考虑的一些细节	167
14.4	光学引伸计实例	167
14.4.1	数据后处理光学引伸计	168
14.4.2	实时测量光学引伸计	169
14.5	光学引伸计测量实例	170
14.5.1	实验布置与实验仪器	170
14.5.2	数据处理与分析	171
第 15 章	求解弹箭起竖发射的临界风速	173
15.1	临界风速求解计算	173
15.2	计算过程的 MATLAB 实现	174
第 16 章	计算发射平台上弹箭倾倒后的运动规律	177
16.1	弹箭倾倒运动模型	177
16.2	运动学方程求解过程的 MATLAB 实现	178
16.3	弹箭倾倒过程的图形化编程	179
第 17 章	计算弹箭吊装意外跌落的运动规律	185
17.1	单侧吊索脱落简化力学模型和常微分方程	185
17.2	运动学方程求解过程的 MATLAB 实现	187

17.3 吊装跌落过程的图形化编程	187
第 18 章 求解热冲击作用下弹药的温度场	195
18.1 弹药热冲击作用下结构模型简化	195
18.2 弹药热冲击作用下传热方程设置	196
18.3 弹药热冲击作用下温度场可视化	197
参考文献	202



上 篇

MATLAB 使用初步

引 言

MATLAB 是 Mathworks 公司开发、维护并经营的一个软件系统。MATLAB 的功能很强大，以至于不能明确定义它是什么样的软件系统。

MATLAB 是一门程序语言，因此它可以和 C、Fortran 等程序语言一样被用于程序开发。MATLAB 也是进行数值计算的强有力工具。事实上，它被开发的目的是用来进行数值计算的，它内部集成了众多的数值计算函数。MATLAB 还包含一个强有力的数据可视化函数库，可以方便地对数据进行绘图和可视化。最主要的，MATLAB 集成了很多专用工具箱，每个工具箱就是一个针对专门问题的函数库，用这些函数可以实现很多功能。如 MATLAB 的图像处理工具箱 (Image Processing Toolbox)，就包含了数字图像处理学科及应用中几乎所有常用功能的函数，可方便地实现复杂图像处理。

MATLAB 功能众多，如数据可视化、数值计算、偏微分方程求解、数据采集及处理等多种功能都可直接用来进行力学问题的理论分析、数值计算及实验信号采集、处理和分析。但是，要实现这些应用，必须先初步掌握 MATLAB 的基础知识和使用技巧。本篇编写的目的就是让读者熟悉和掌握 MATLAB 的基本应用。

如前所述，MATLAB 体系庞大，内容非常多，要想完全学会 MATLAB 是不现实的，并且也没必要。因此，本篇向读者介绍 MATLAB 的最核心和最基本的内容，有了这些基础，读者的深入学习就不会有根本性的障碍了。另外，本篇着重向读者介绍基本的学习方法，以期做到“授人以渔”，这样读者再遇到新的问题时，一般就可以自行解决了。

对于 MATLAB 的新手来说，本篇是下篇的基础，但如果读者熟悉 MATLAB，则可跳过本篇，直接进行下篇的阅读和练习。

》》》 第 1 章

MATLAB 简介

Mathworks 公司对 MATLAB 的定义是: MATLAB is a high-performance language for technical computing. It integrates computation, visualization, and programming in an easy-to-use environment where problems and solutions are expressed in familiar mathematical notation. 这段话全面而准确地概括了 MATLAB 的功能和特点。读懂了这句话,就了解了 MATLAB 的精髓^①。本章力图通过解释这句话向读者展示 MATLAB 的功能和特点。

1.1 MATLAB 的功能

1.1.1 “language”——MATLAB 是一种语言

MATLAB 是一种编程语言。既然是语言,就和 Basic、Fortran、C 一样,可以用来编程 (Programming)。

例 1: 用 MATLAB 写一个最简单的程序。

```
>> %The first MATLAB program
s='This is my first MATLAB program!';
disp(s)
```

输出结果为

```
This is my first MATLAB program!
```

直接将上面这个语句 (第一句是注释,可以不要) 在 MATLAB 的 Command Window 中运行,或者建一个脚本 (.m 文件),将此句话输入后运行,都会在 MATLAB 的 Command Window 中输出 “This is my first MATLAB program!”。

例 2: 生成一个等差数列 {1,3,5,7,9}, 并将大于 5 的数变为 0。

```
>> %A MATLAB program to create a vector and to change its elements
a = 1:2:10
```

输出结果为

```
a =
    1     3     5     7     9
```

^① 但如果能够真正读懂这句话,你肯定已经是 MATLAB 编程高手了。


```
for i = 1:5,
    if a(i) > 5
        a(i) = 0;
    end
end
a
```

输出结果为

```
a =
    1     3     5     0     0
```

从上面两个例子可以看出, MATLAB 确实可以像其他编程语言一样, 用来写程序, 只是语法稍有差异而已。

1.1.2 “computing”——MATLAB 可以用来计算

如果了解数值方法且编程水平足够高, 则任何编程语言都可以用来计算。但由于 MATLAB 内置了很多计算方法及其函数实现, 即使不懂数值方法, 也可以进行一些复杂计算。

例 3: 求一个矩阵的逆阵, 并进行矩阵相乘运算。

```
>> a = [1 2; 3 4]
b = inv(a)
c = a*b'
```

输出结果为

```
a =
     1     2
     3     4

b =
 -2.0000     1.0000
  1.5000    -0.5000

c =
     0     0.5000
 -2.0000     2.5000
```

解释: `inv()` 是 MATLAB 的函数, 表示求矩阵的逆阵。b' 表示矩阵 b 的转置。

从 MATLAB 的名字可以看出, MATLAB 是以矩阵运算见长的^①。MATLAB 的矩阵运算都经过很好的优化, 且大多用内部函数实现, 因此计算效率很高。虽然 MATLAB 是解释性语言, 但矩阵运算在 MATLAB 环境中并不慢。除矩阵运算外, MATLAB 中还提供了很多其他数值计算的函数, 包括微积分、插值、拟合等, 此外, 还专门有优化、微分方程求解等工具箱, 可以很方便地调用这些函数进行数值计算, 且计算速度较快。

例 4: 进行最小二乘直线拟合。

```
>>%A MATLAB program to fit the experimental data using
%least square method and then plot the result
```

① MATLAB 的名字来源于 “Matrix Laboratory” 两个词的缩写和组合。


```
x=1:10;  
y = 3*x + 5 + rand(1,10)*4;  
plot(x,y,'ko');  
hold  
p = polyfit(x,y,1);  
y1 = polyval(p,x);  
plot(x,y1, 'color', 'k', 'linewidth', 3)  
xlabel('X');  
ylabel('Y');  
legend('noisy data', 'fitted line');
```

拟合结果如图 1-1 所示。

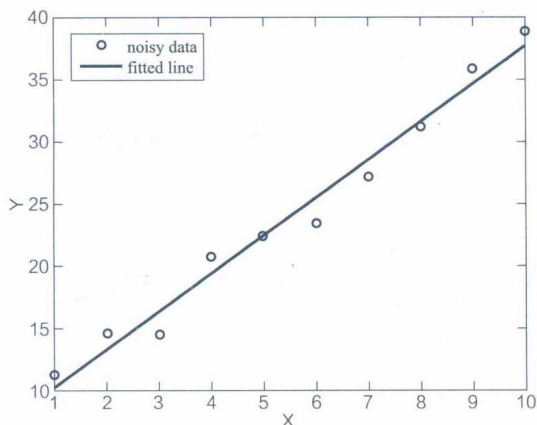


图 1-1 最小二乘拟合示意

上例中仅用 `polyfit` 一个函数就完成了数据的最小二乘拟合(该函数可以完成任意阶次的多项式拟合)。

由于 MATLAB 语法简单,用 MATLAB 进行计算非常方便。事实上,如果不善于或不喜欢使用 Windows 的计算器, MATLAB 完全可以用作一个计算器。如在 Command Window 中输入

```
>>100.9+301/43
```

输出结果为

```
ans =  
107.9000
```

MATLAB 甚至还可以进行符号运算,如例 5 所示。

例 5: 求一个符号矩阵的特征值。

```
>>% A MATLAB program to calculate the eigenvalues of matrix  
syms a b c  
sigma = [a b; b c];  
p_sigma = eig(sigma);
```




```
p_sigma
1/2*a+1/2*c+1/2*(a^2-2*a*c+c^2+4*b^2)^(1/2)
1/2*a+1/2*c-1/2*(a^2-2*a*c+c^2+4*b^2)^(1/2)

p_sigma =
a/2 + c/2 - (a^2 - 2*a*c + 4*b^2 + c^2)^(1/2)/2
a/2 + c/2 + (a^2 - 2*a*c + 4*b^2 + c^2)^(1/2)/2

ans =
a/2 + c/2 + (a^2 - 2*a*c + 4*b^2 + c^2)^(1/2)/2

ans =
a/2 + c/2 - (a^2 - 2*a*c + 4*b^2 + c^2)^(1/2)/2
```

上述计算结果是矩阵的两个特征值的表达式^①。

1.1.3 “visualization”——MATLAB 是数据可视化工具

MATLAB 中有完整的、专门的数据可视化函数和工具,可供用户方便地将复杂的计算结果显示成各种对应图形。下面给出一些用 MATLAB 进行数据可视化的例子。图 1-2 是用 MATLAB 中的 `plotyy` 函数绘制的双 y 轴曲线。图 1-3 是用 MATLAB 中的 `peaks` 函数和 `surf` 函数生成的数据的曲面和等值线。

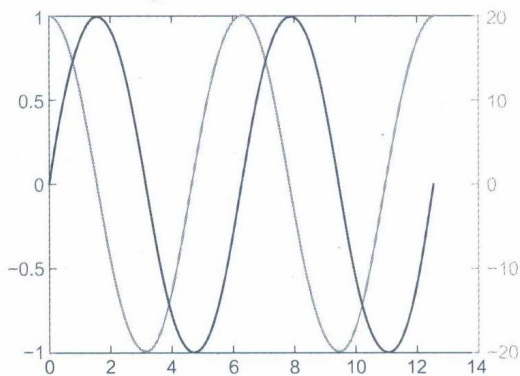


图 1-2 MATLAB 绘制的曲线

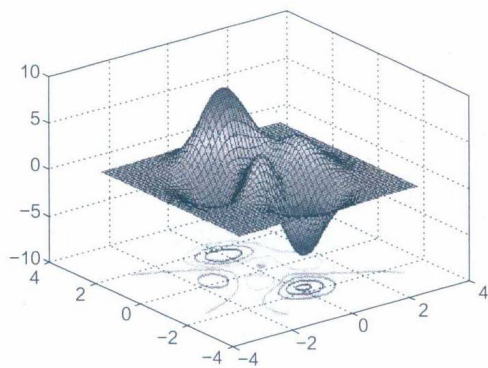


图 1-3 MATLAB 绘制的曲面

图 1-4 是用 MATLAB 中的 `slice` 函数绘制的流体数据的四维显示图。用颜色表示第四维信息。图 1-5 是用 MATLAB 中的 `surface` 函数画的三维贴图效果。在图 1-5 中,将人脸二维照片的颜色数据作为三维图的颜色矩阵。

除此之外, MATLAB 还有专门的虚拟现实工具箱,为动态复杂数据的可视化提供了可能。

^① 由材料力学或弹性力学知识可知,如果 a , b , c 分别代表正应力和剪应力,则此计算结果是平面应力状态两个主应力的表达式。