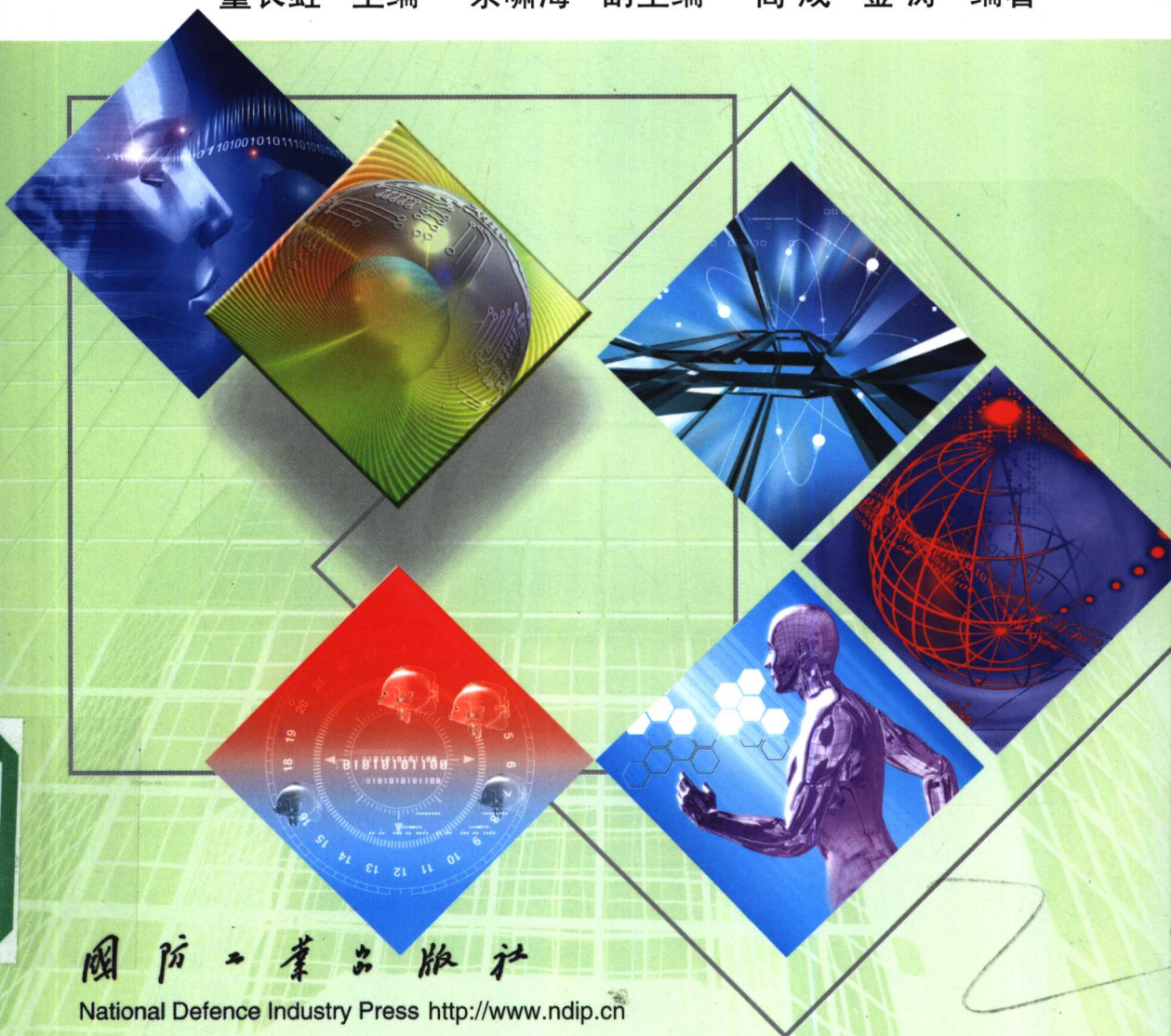


Matlab

Matlab 应用丛书

信号处理与应用

董长虹 主编 余啸海 副主编 高成 金涛 编著



国防工业出版社

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

Matlab 应用丛书

Matlab 信号处理与应用

董长虹 主 编

余啸海 副主编

高 成 金 涛 编 著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

Matlab 信号处理与应用 / 董长虹编著. —北京:国防
工业出版社, 2005. 1

(Matlab 应用丛书)

ISBN 7-118-03767-2

I. M... II. 董... III. 信号处理 - 算法语言 - 应用
软件, Matlab IV. TN911.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 001644 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)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 710×960 1/16 印张 19 $\frac{3}{4}$ 375 千字

2005 年 1 月第 1 版 2005 年 1 月北京第 1 次印刷

印数: 1—4000 册 定价: 27.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010)68428422

发行邮购: (010)68414474

发行传真: (010)68411535

发行业务: (010)68472764

内 容 简 介

本书共分为 8 章,内容包括 Matlab 概述、信号与系统理论与 Matlab 实现、傅里叶变换与 Matlab 实现、FIR 数字滤波器的 Matlab 实现、IIR 数字滤波器的 Matlab 实现、统计信号处理的 Matlab 实现以及图形化信号处理工具——SPTool 等。

本书可作为大学本科、专科教材或参考书,也可作为涉及图像处理的工程技术人员参考书。

丛书编委会

丛书主编 董长虹

丛书副主编 余啸海

编委会成员	袁望宏	赵辟唐	朱大伟	刘晓民	赵 仁
	钱永强	王小虎	郑 滨	刘 恒	巨 勇
	赵 霞	李 毅	张绍名	郝 伟	周海冰
	郑 智	康静荣	陈宣裕	任家萱	肇 衡
	刘云飞	韩进强	李安国	何 龙	李永伟
	程思涵	马远征	董智超	金 涛	

前言

本书以具体实例讲述 Matlab 信号处理中使用的函数、方法,以帮助读者用 Matlab 解决信号处理中的问题、难题,提高工作效率。

本书共分为 8 章,第 1 章是 Matlab 的概述,第 2 章和第 3 章分别讲述了信号与系统理论与 Matlab 实现、傅里叶变换与 Matlab 实现,第 4 章介绍了 Matlab 实现信号转换。第 5 章、第 6 章和第 7 章讲述了 FIR 数字滤波器的 Matlab 实现、IIR 数字滤波器的 Matlab 实现和统计信号处理的 Matlab 实现。第 8 章介绍了图形化信号处理工具——SP-Tool。本书还附有 Matlab 符号和命令列表以及 Matlab 信号处理工具箱函数列表。

本书中的所有程序都是经过实际调试的。但是由于本书覆盖的领域广泛、内容多,难免有错误和遗漏的地方,欢迎广大读者批评指正。

作 者

目 录

第 1 章 Matlab 概述	1
1.1 Matlab 简介	1
1.2 Matlab 编程基础	3
1.2.1 变量和数学运算	3
1.2.2 数组和矩阵	8
1.2.3 程序控制语句	15
1.2.4 辅助语句	19
1.2.5 Matlab 的输入与输出语句	19
1.2.6 变量的保存与装载	20
1.3 M 文件与 M 函数	22
1.4 Matlab 使用时的一些技巧	24
1.4.1 避免使用循环	24
1.4.2 大型矩阵维度的预先确定	26
第 2 章 信号与系统理论与 Matlab 实现	28
2.1 连续时间信号和离散时间信号	28
2.1.1 信号的能量与功率	28
2.1.2 周期信号与非周期信号	29
2.1.3 自变量变换	30
2.1.4 基本信号介绍	32
2.2 连续时间与离散时间系统	43
2.2.1 系统的基本性质	44
2.2.2 信号系统的 Matlab 实现	47

第3章 傅里叶变换与 Matlab 实现	51
3.1 傅里叶级数表示	51
3.1.1 连续时间傅里叶级数	51
3.1.2 频谱的概念	53
3.1.3 傅里叶级数的其他形式	53
3.1.4 连续时间傅里叶级数的系数确定	55
3.1.5 周期性矩形脉冲信号的频谱	55
3.1.6 离散时间信号的傅里叶级数表示	57
3.1.7 傅里叶级数与 LTI 系统	62
3.2 离散时间傅里叶变换	63
3.2.1 非周期信号的离散时间傅里叶变换	63
3.2.2 周期信号的离散时间傅里叶变换	71
3.2.3 离散时间傅里叶变换的性质	73
3.3 快速傅里叶变换	79
3.3.1 离散傅里叶变换和离散逆傅里叶变换	79
3.3.2 蝶形分解	80
3.3.3 用 Matlab 实现快速傅里叶变换	84
第4章 Matlab 实现信号变换	90
4.1 拉普拉斯变换	90
4.1.1 拉普拉斯变换的原理	90
4.1.2 拉普拉斯反变换	92
4.1.3 拉普拉斯变换的性质	93
4.1.4 利用拉普拉斯变换分析与表征 LTI 系统	95
4.1.5 单边拉普拉斯变换	96
4.2 Z 变换	97
4.2.1 双边 Z 变换	98
4.2.2 Z 反变换	99
4.2.3 Z 变换的性质	101
4.2.4 利用 Z 变换分析与表征 LTI 系统	103
4.2.5 单边 Z 变换	104
4.3 离散余弦变换	109
4.4 希尔伯特(Hilbert)变换	115
第5章 FIR 数字滤波器的 Matlab 实现	118

5.1	数字滤波器及其结构	118
5.2	FIR 低通数字滤波器的设计原理	121
5.2.1	FIR 低通数字滤波器的设计原理	121
5.2.2	滤波器类型的设计	126
5.3	用 Matlab 设计 FIR 滤波器	128
5.3.1	FIR 滤波器的基本设计	129
5.3.2	窗函数	133
5.3.3	频率采样	150
第 6 章	IIR 数字滤波器的 Matlab 实现	157
6.1	IIR 数字滤波器的实现原理	157
6.1.1	IIR 数字滤波器的传递函数及特点	157
6.1.2	IIR 滤波器的基本结构	157
6.2	IIR 数字滤波器的设计方法	160
6.2.1	常用的模拟原型滤波器	160
6.2.2	冲激响应不变法	162
6.2.3	阶跃响应不变法	163
6.2.4	双线性变换法	163
6.3	IIR 数字滤波器的设计和实现	164
6.4	Matlab 实现 IIR 滤波器	168
第 7 章	统计信号处理的 Matlab 实现	195
7.1	统计信号处理的理论基础	196
7.1.1	功率谱密度	196
7.1.2	自相关函数与互相关函数	199
7.1.3	随机过程的一般表达	199
7.1.4	平稳过程的相关函数与功率谱密度	201
7.2	利用 Matlab 实现统计信号处理	204
第 8 章	图形化信号处理设计工具——SPTool	222
8.1	SPTool 工具介绍	222
8.2	信号浏览器	226
8.3	滤波器浏览器和滤波器设计器	229
8.4	频谱浏览器	235
8.5	综合实例	236

附录 A Matlab 符号和命令列表	242
A.1 Matlab 的标点及符号	242
A.1.1 算术运算符	242
A.1.2 关系运算符	242
A.1.3 逻辑运算符	242
A.1.4 特殊符号	243
A.2 Matlab 的函数及指令	243
A.2.1 a	243
A.2.2 b	244
A.2.3 c	244
A.2.4 d	246
A.2.5 e	247
A.2.6 f	248
A.2.7 g	249
A.2.8 h	250
A.2.9 i	251
A.2.10 j, k	252
A.2.11 l	252
A.2.12 m	253
A.2.13 n	254
A.2.14 o	255
A.2.15 p	255
A.2.16 q	257
A.2.17 r	257
A.2.18 s	258
A.2.19 t	260
A.2.20 u	261
A.2.21 v	261
A.2.22 w	261
A.2.23 x, y, z	262
附录 B Matlab 信号处理工具箱函数	263
B.1 滤波器分析	263
B.2 滤波器实现	266

B.3	FIR 数字滤波器设计	268
B.4	IIR 数字滤波器设计	273
B.5	IIR 滤波器阶估计	275
B.6	模拟低通滤波器原型	276
B.7	模拟滤波器设计	276
B.8	模拟滤波器变换	277
B.9	滤波器离散化	278
B.10	线性系统变换	278
B.11	窗函数	282
B.12	变换函数	284
B.13	Cepstral 分析	286
B.14	统计信号处理与频谱分析	286
B.15	参数模型函数	292
B.16	线性预测	293
B.17	多抽样信号处理	296
B.18	波形的产生	298
B.19	特殊操作	300
B.20	图形用户界面工具	303

第 1 章 Matlab 概述

1.1 Matlab 简介

Matlab 语言是当今科学界（尤其是自动控制领域）最具影响力、也是最有活力的软件。它起源于矩阵运算，并已经发展成一种高度集成的计算机语言。它提供了强大的科学运算、灵活的程序设计流程、高质量的图形可视化与界面设计、便捷的与其他程序和语言接口的功能。Matlab 语言在各国高校与研究单位发挥着重要作用。

Matlab 语言的首创者 Cleve Moler 教授在数值分析，特别是在数值线性代数领域很有影响力，他参与撰写了数值分析领域一些著作并参与编写了两个重要的 Fortran 程序——EISPACK 和 LINPACK。他曾在密歇根大学、斯坦福大学和新墨西哥大学任数学与计算机科学教授。1980 年前后，时任新墨西哥大学计算机系主任的 Moler 教授在讲授线性代数课程时，发现用其他高级语言编程极为不便，便构思并开发了 Matlab (MATrix LABoratory, 即矩阵实验室)，这一软件利用当时数值线性代数领域最高水平的 EISPACK 和 LINPACK 两大软件包中可靠的子程序，用 Fortran 语言编写了集命令翻译、科学计算于一体的交互式软件系统。

所谓交互式语言，是指人们给出一条命令，立即就可以得出该命令的结果。该语言无需像 C 语言和 Fortran 语言那样，首先要求使用者编写源程序，然后对之进行编译、连接，最终形成可执行文件。这无疑会给使用者带来极大的方便。早期的 Matlab 是用 Fortran 语言编写的，只能作矩阵运算；绘图也只能用极其原始的方法，即用星号描点的形式画图；内部函数也只提供了几十个。但即使当时的功能十分简单，当它作为免费软件一出现，还是吸引了大批的使用者。

Cleve Moler 和 John Little 等人成立了一个名为 The MathWorks 的公司，Cleve Moler 一直担任该公司的首席科学家。该公司于 1984 年推出了第一个 Matlab 商业版本。当时的 Matlab 版本已经用 C 语言进行了完全的改写，其后又增添了图形图像处理、多媒体功能、符号运算和与其他流行软件的接口功能，使得 Matlab 的功能越来越强大。

The MathWorks 公司于 1992 年推出了具有划时代意义的 Matlab 4.0 版本，并于

1993 年推出了其微机版,可以配合 Microsoft Windows 一起使用,使之应用范围越来越广。1994 年推出的 4.2 版本进一步扩充了 4.0 版本的功能,尤其在图形界面设计方面更提供了新的方法。

1997 年推出的 Matlab 5.0 版本允许更多的数据结构,如单元数据、数据结构体、多维矩阵、对象与类等,使其成为一种更便于编程的语言。1999 年初推出的 Matlab 5.3 版本在很多方面又进一步改进了 Matlab 语言的功能。

2000 年 10 月底推出了全新的 Matlab 6.0 正式版本(Release12),在核心数值算法、界面设计、外部接口、应用桌面等诸多方面有了极大的改进。

虽然 Matlab 语言是计算数学专家倡导并开发的,但其普及和发展离不开自动控制领域学者们的贡献。因为在 Matlab 语言的发展进程中,许多有代表性的成就与控制界的要求和贡献是分不开的。迄今为止,大多数工具箱也都是控制方面的。Matlab 具有强大的数学运算能力、方便实用的绘图功能及语言的高度集成性,它在其他科学与工程领域的应用也是越来越广,并且有着更广阔的应用前景和无穷无尽的潜能。如果有一种十分有效的工具能解决在教学与研究中遇到的问题,那么 Matlab 语言正是这样的一种工具。它可以将使用者从繁琐、无谓的底层编程中解放出来,把有限的时间更多地花在解决问题中,这样无疑会提高工作效率。

目前,Matlab 已经成为国际上最流行的科学与工程计算软件工具,现在的 Matlab 已经不仅仅是一个“矩阵实验室”了,它已经成为一种具有广泛应用前景的全新的计算机高级编程语言,有人称它为“第四代”计算机语言,它在国内外高校和研究部门中正扮演着重要的角色。Matlab 语言的功能也越来越强大,不断适应新的要求提出新的解决方法。可以预见,在科学运算、自动控制与科学绘图领域,Matlab 语言将长期保持其独一无二的地位。

Matlab 工作环境包括:帮助系统、工作内存管理、指令和函数管理、搜索路径管理、操作系统、程序调试和性能剖析工具等。Matlab 改变了过去单调依靠“在指令窗通过纯文本形指令进行各种操作”的面貌,引入了许多让使用者一目了然的图形界面,如在线帮助的交互型界面 helpwin,管理工作内存的 workspace,交互式的路径管理界面 pathtool,指令窗显示风格设置界面等。它们的开启方式有:工具条图标开启、选择菜单项开启和直接“文本式”指令开启。在 Matlab 5 以后的版本中更进一步将图形显示窗改变成了交互操作的可编辑图形界面。

进入 Matlab 之后,会看到一个窗口 Matlab Command Window(称为指令窗口见图 1.1),它是键入指令的地方也是显示计算结果的地方。它的功能选单有 File、Edit、Options、Windows、Help 五个主要功能,每一个之下又各有下一层的功能,我们会在后面的内容结合使用陆续说明。

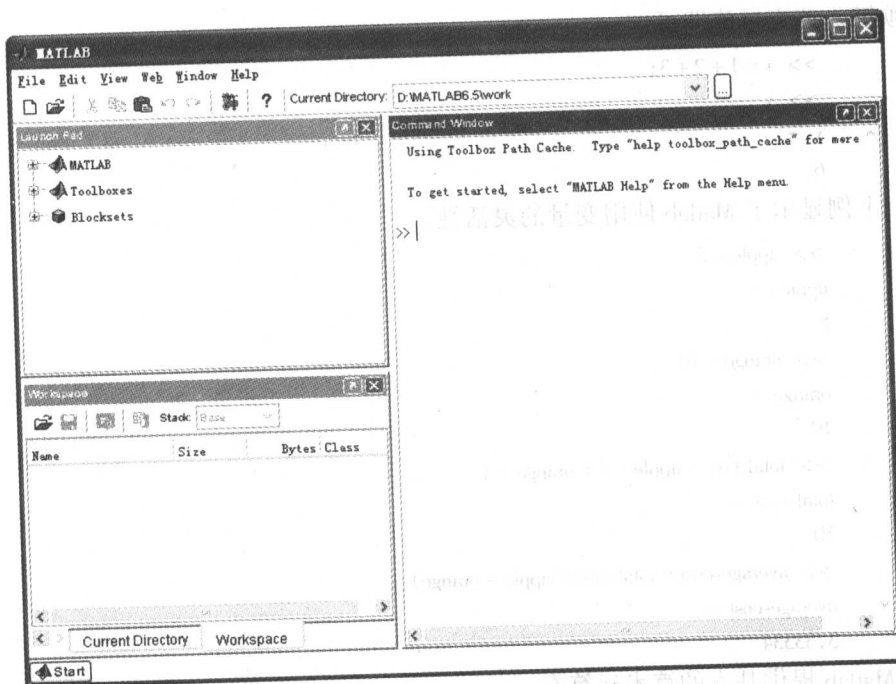


图 1.1 Matlab 主窗口

1.2 Matlab 编程基础

1.2.1 变量和数学运算

首先从 Matlab 的数学运算开始说明。例如要计算 $1+2+3$ 及 $1 \times 10 + 2 \times 20 + 3 \times 30$, 如下列所示, 在提示符号“>>”之后是要键入的算式, Matlab 将计算的结果以 ans 显示。如果算式是 $x = 1 + 2 + 3$, Matlab 将计算的结果以 x 显示。

```
>> 1+2+3
```

```
ans =
```

```
6
```

```
>> 1 * 10 + 2 * 20 + 3 * 30
```

```
ans =
```

```
140
```

```
>> x = 1+2+3
```

```
x =
```

```
6
```

如果在上例结尾加上“;”, 则计算结果不会显示在指令窗口上, 要得知计算值

只须键入该变量值即可：

```
>> x = 1 + 2 + 3;
>> x
x =
6
```

下例显示了 Matlab 使用变量的灵活性。

```
>> apple = 5
apples =
5
>> orange = 10
orange =
10
>> total-cost = apple * 2 + orange * 4
total-cost =
50
>> average-cost = total-cost / (apple + orange)
average-cost =
3.33334
```

Matlab 提供基本的算术运算有：

加 (+)、减 (-)、乘 (*)、除 (/)、乘方 (^)

例如下面的这些语句：

```
5 + 3, 5 - 3, 5 * 3, 5 / 3, 5^3
```

其他的常用计算功能用一个算式来说明。要计算面积 $\text{Area} = \pi r^2$, 半径 $r = 2$, 则可键入：

```
>> r = 2;
>> area = pi * r^2;
>> area =
12.5664
```

用户也可以将上述指令打在同一行, 以“,”或“;”分开, 例如：

```
>> r = 2, area = pi * r^2
>> r = 2; area = pi * r^2;
```

请注意上述二式的差异, 前者有计算值显示, 而后者则没有。如果一个指令过长可以在结尾加上“...”(代表此行指令与下一行连续), 例如：

```
>> r = 2;
>> area = pi...
* r^2
```

Matlab 提供了众多的基本数学函数, 下面是它们的分类列表(见表 1.1 至表 1.6), 这些函数在以后的章节中将会用到：

表 1.1 三角函数和双曲函数

名称	含 义	名称	含 义	名称	含 义
sin	正弦	csc	余割	atanh	反双曲正切
cos	余弦	asec	反正割	acoth	反双曲余切
tan	正切	acsc	反余割	sech	双曲正割
cot	余切	sinh	双曲正弦	csch	双曲余割
asin	反正弦	cosh	双曲余弦	asech	反双曲正割
acos	反余弦	tanh	双曲正切	acsch	反双曲余割
atan	反正切	coth	双曲余切	atan2	四象限反正切
acot	反余切	asinh	反双曲正弦		
sec	正割	acosh	反双曲余弦		

表 1.2 指数函数

名称	含 义	名称	含 义	名称	含 义
exp	e 为底的指数	log10	10 为底的对数	pow2	2 的幂
log	自然对数	log2	2 为底的对数	sqrt	平方根

表 1.3 复数函数

名称	含 义	名称	含 义	名称	含 义
abs	绝对值	conj	复数共轭	real	复数实部
angle	相角	imag	复数虚部		

表 1.4 取整函数和求余函数

名称	含 义	名称	含 义
ceil	向 $+\infty$ 圆整	rem	求余数
fix	向 0 圆整	round	向靠近整数圆整
floor	向 $-\infty$ 圆整	sign	符号函数
mod	模除求余		

表 1.5 矩阵变换函数

名称	含 义	名称	含 义
fip1r	矩阵左右翻转	diag	产生或提取对角阵
fipud	矩阵上下翻转	tril	产生下三角
fipdim	矩阵特定维翻转	triu	产生上三角
Rot90	矩阵反时针 90° 翻转		

表 1.6 其他函数

名称	含 义	名称	含 义
min	最小值	max	最大值
mean	平均值	median	中位数
std	标准差	diff	相邻元素的差
sort	排序	length	个数
norm	欧氏 (Euclidean) 长度	sum	总和
prod	总乘积	dot	内积
cumsum	累计元素总和	cumprod	累计元素总乘积
cross	外积		

Matlab 可以将计算结果以不同精确度的数字格式显示,我们可以在 Options 下选 Numerical Format,或者直接在指令窗口键入表 1.7 所列各个数字显示格式的指令(以 π 值为例)。

表 1.7 数值格式列表

指 令	数 字 值	说 明
Format short	3.1416	预设的 4 位有效小数位数
Format long	3.14159265358979	15 位有效小数位数
Format short e	3.1416e + 000	4 位有效小数位数加上指数格式

Matlab 对使用变量名称的规定:

- 变量名称的英文大小写是有区别的(例如 apple, Apple, AppLe 是三个不同变量)。
- 变量的长度上限为 19 个字节。
- 变量名的第一个字必须是英文字母,随后可以使用英文字符、数字或下划