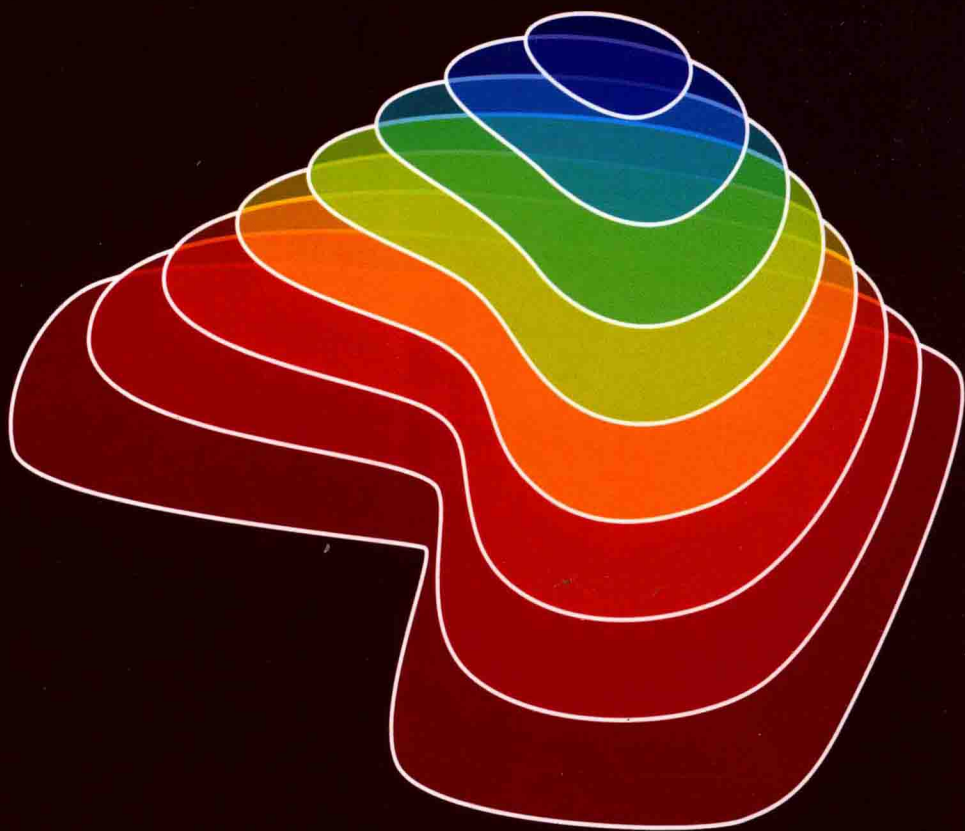


Experiments with MATLAB (中译本)

# MATLAB之父：编程实践

(修订版)



[美] Cleve Moler 著

薛定宇 译

MATLAB<sup>®</sup>  
*examples*



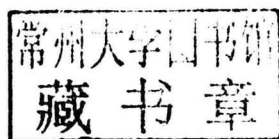
北京航空航天大学出版社  
BEIHANG UNIVERSITY PRESS

Experiments with MATLAB(中译本)

# MATLAB 之父：编程实践

(修订版)

[美] Cleve Moler 著  
薛定宇 译



北京航空航天大学出版社

## 内 容 简 介

本书是 MATLAB 之父 Cleve Moler 的力作。作者通过 20 个有趣的主题介绍了 MATLAB 程序设计的思想与方法,主题内容包括:迭代、斐波那契数、日历与时钟、矩阵、线性方程组、蕨型叶分形、谷歌的网页排名值、指数函数、T 形积木、幻方问题、井字棋的魅力、生命游戏、曼德勃罗集、数独、常微分方程、捕食者与猎物模型、轨道、浅水方程、摩尔斯电码、音乐。通过这些主题本书也循序渐进地介绍了微积分、矩阵、线性代数方程、指数、复数、分形、微分方程甚至偏微分方程等数学内容,即使没有这些方面的基础或没有学过相关的课程,也可以通过本书的介绍很好地理解本书的基础知识,为以后进一步学习这些课程提供全新的视角和理解方法。本书作者的思路独特、视野宽广,语言严谨又不失风趣幽默,案例程序完整精练,易学易懂。

本书适合于大学低年级的学生,也可供各学科及有一定 MATLAB 基础的读者作参考用。

### 图书在版编目(CIP)数据

MATLAB 之父:编程实践/(美)莫勒  
(Cleve Moler)著;薛定宇译.--修订本.--北京:  
北京航空航天大学出版社,2018.6  
ISBN 978-7-5124-2751-8

I. ①M… II. ①莫… ②薛… III. ①Matlab 软件—高等学校—教材 IV. ①TP317

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 143021 号

英文原名:Experiments with MATLAB

Copyright © 2014 Cleve Moler.

Translation Copyright © 2018 by Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press.

All right reserved.

本书中文简体字版由 Cleve Moler 本人授权北京航空航天大学出版社在中华人民共和国境内独家出版发行。版权所有,侵权必究。

Experiments with MATLAB(中译本)

MATLAB 之父:编程实践(修订版)

[美] Cleve Moler 著

薛定宇 译

责任编辑 陈守平

\*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(邮编 100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱:goodtextbook@126.com 邮购电话:(010)82316936

艺堂印刷(天津)有限公司印装 各地书店经销

\*

开本:710×1 000 1/16 印张:18 字数:353 千字

2018 年 7 月第 2 版 2018 年 7 月第 1 次印刷 印数:4 000 册

ISBN 978-7-5124-2751-8 定价:52.00 元

*I am very pleased to see the continued interest in MATLAB and EXM in China. And I very much want to thank my friend Professor Xue Dingyü for the excellent translation.*

*Cleve Moler*

*Prescott, AZ, USA*

*June 17, 2018*

我很高兴地看到在中国人们对 MATLAB 与我著作的持续兴趣。我非常感谢我的朋友薛定宇教授的完美翻译。

克利夫·莫勒

美国亚利桑那州普雷斯科特

2018年6月17日

## 写在前面

非常荣幸受北京航空航天大学出版社陈守平老师的邀请，为薛定宇教授翻译的克利夫·莫勒 (Cleve Moler) 的《MATLAB之父：编程实践》(Experiments with MATLAB) 的中文版作序，能有机会为这样一位享誉世界的大师的中文版作品、并且是由本人非常推崇的薛老师亲自翻译的作品写序，我倍感荣幸，但同时也感受到巨大的压力。

本书中文版的问世起源于这样一个契机：2012年10月克利夫到访中国，这是他在MathWorks中国公司2007年成立后第一次来到中国，本人有幸安排并全程参与了他在中国的活动，这包括了在7所高校的演讲和在北京上海两地的图书作者见面会。正是在北京的图书作者见面会上，我结识了北京航空航天大学出版社的蔡喆和陈守平两位老师，并亲眼见证了她们出色的工作能力，当场同克利夫就他的两本MATLAB专著的版权引进达成一致。

《MATLAB之父：编程实践》是克利夫继《MATLAB数值分析与科学计算——基于MATLAB(修订版)》(Numerical Computing with MATLAB)之后所独立编写的第二本关于MATLAB应用的书籍，主要是面向高中或大学低年级的读者，目的是想通过实验的方法将MATLAB语言介绍给广大的初学者，为大家提供一系列在应用数学、科学计算和MATLAB编程中有代表性的非常实用且有深刻数学意义的实验案例，从而帮助学习人员加深产品认知并有效提高工程应用能力。此书电子首稿于2008年完成并在之后的5年里，进行了陆陆续续的精心修订，这次是该书的首个中文版。

此书英文原版行文生动，案例新颖，处处体现数学之美，字里行间更无不反映出作者的奇思妙想，风趣易懂，每个实验案例的解答都充斥着一种探求式的好奇精神。强烈的好奇心，这是在此次克利夫中国行中本人与他相处2周下来对他的最深印象，大到人文历史风土人情，小到会议讲座礼尚往来，他都保持着一种童真般的好奇。这种强烈的好奇心也可以从这本书涉猎广泛的内容中得到体会——矩阵、历法、谷歌网页排名、音乐、天体运行、分形图、生命进化、数独等包罗万象。

这些精彩的内容连同生动文笔都在薛老师的译本中得到了很好的体现，薛老师自己的书在读者中享有很高声誉，我最早拜读的就是他写的自动控制领域经典的教材《控制系统计算机辅助设计——MATLAB语言与应用》(清华大学出版社，1996)，

结构严谨,思维缜密,内容翔实。这种风格在此书中文版的翻译中与原文达到了奇妙融合,使读者在领略克利夫的独特思路时逻辑清晰,而且兴趣盎然,一定是一次非常愉快的阅读体验。

此书是北京航空航天大学出版社与我司在图书合作方面的一个杰作,是我司今年中国图书计划的最重要的一个项目,该项目负责人刘楠在整个过程中起到了很大的作用,克利夫本人更是对此合作充满期待,他特意为此书中文版的即将问世写来祝词

“When I visited several universities in China recently, I had a chance to see the great interest in MATLAB personally. So I am very pleased to thank Professor Xue Dingyü and BUAA Publishing for making this translation available.-Cleve”。

我相信此书中文版的问世,为广大中国用户学习MATLAB提供了一个非常好的手段。通过克利夫,这位MATLAB创始人的介绍,不仅能很好地理解MATLAB的基础知识,更能在他的指导下,通过实践的方式,切实有效地提高MATLAB语言的实际运用能力。所以本书对那些想尽早接触MATLAB语言的读者是很有价值的。

陈 炜

MathWorks 中国教育业务发展总监,上海

## 译者的话

克利夫·莫勒 (Cleve Moler) 是 MATLAB 的首创者，也是享誉世界的迈斯沃克公司 (MathWorks) 的缔造者之一和首席科学家。他 1997 年当选美国工程院院士，2007-2008 年担任美国工业与应用数学学会 (Society of Industrial and Applied Mathematics, SIAM) 的主席，2012 年获得 IEEE 计算机学会的计算机先驱奖 (Computer Pioneer Award 2012, IEEE Computer Society)。

三十多年前，克利夫在讲授线性代数课程时，觉得用当时最好的计算机工具仍然不是很方便，就构思并实现了 MATLAB。现在 MATLAB 已经成为科学与工程界的通用计算机语言，并为很多领域的首选计算机语言，为现代科学与技术的发展做出了重要的贡献。今天的 MATLAB 完全担当得起其广告词所说的“加速工程与科学的步伐”(Accelerating the Pace of Engineering and Science) 的重任。

当年 MATLAB 语言起源于“矩阵实验室”(matrix laboratory)，本书克利夫也是沿用这样的思路，想通过实验的方法将 MATLAB 语言介绍给更多的读者。原书的定位，是面向高中或大学低年级的读者，所以对读者在数学方面的要求并不是很高，本书也循序渐进地介绍了微积分、矩阵、线性代数方程、指数、复数、分形、微分方程甚至偏微分方程等数学内容，即使没有这些方面的基础或没有学过相关的课程，也可以通过克利夫的介绍很好地理解本书的基础知识，为以后进一步学习这些课程提供全新的视角和理解方法。所以本书对那些想尽早接触 MATLAB 语言的读者是很有价值的。

虽然本书对面向的读者群的数学与科学基础要求不是很高，但本书的很多内容对一些 MATLAB 的高级使用者仍有很好的借鉴意义。通过本书的翻译，我本人在编程技巧方面已经受益匪浅。

本书涉猎广博，取材和所选的例子生动有趣，引人入胜，行文流畅，文笔生动。通过独特的思路，克利夫介绍了很多科学运算与计算机编程的细节，如迭代过程、递归结构、图形用户界面设计、单元数组、二元树、回溯法等，读者可以阅读本书来学习这些内容，但更重要的是在原书提供的代码下进行实验。书中配备了大量的练习题，通过练习题可以更好地实践所学内容，提高 MATLAB 语言的实际运用能力。通过实践获得第一手编程经验，这是阅读任何书籍都不能取代的，只有通过实践，才能使得读者尽快熟悉与掌握这一科学与工程利器，为其他课程的学习与科研工作打造一把

新的“钥匙”,为取得更大的成就奠定必要的基础和准备。

由于原书是作者写于不同时期的讲稿,在很多方面是不尽统一的,所以译者逐幅重新处理了插图,规范化了图形的大小和表示形式,合并了若干程序行,改善了很多矩阵和公式的排版效果,使得译作排版风格更紧凑,并尽力做到美观。按照中国科技文献的出版规则,将矩阵和向量等统一用黑体符号表示出来。考虑到读者可能对英语方面的要求,本书每章的标题与必要的关键词也都同时给出了英文原词,在某些地方还以译者注的形式给出了必要的解释,便于读者参考。

本书全部MATLAB代码和其他相关资源都可以从克利夫本人的网页直接下载,建议读者广为利用

<http://www.mathworks.com/moler>

受北京航空航天大学出版社陈守平老师的邀请,本人有机会得以为这样一位享誉世界的大师的作品作译,倍感荣幸但同时也感受到巨大的压力。原书涉及的内容从天文历法到音乐,从生命进化到天体运行,从古老的传说到绚丽多彩的分形图,覆盖面极广,除了一般的技術内容之外,更有很多的文化、历史、艺术方面的内容,译者只能尽力而为,力图准确地反映原作者的思想和表述。此外,这次翻译工作是本人的第一次书面翻译,限于个人的水平、经验、学识和素养,疏漏之处在所难免,希望读者不吝指正。

由于本人的文风和风格可能过于严谨或古板,实在难以再现克利夫原作的生动文风,所以在译文基本完成后特别邀请读者可能的同龄人——我的女儿薛杨为全书进行了文字润色,并完成了某些章节的初译,在此特别感谢。

**修订版说明:**由于克利夫原作没有更新,所以这次修订版做了以下更新:

- (1)修正了原版的一些错误,包括文字与格式不妥之处,重新处理了排版格式;
- (2)补齐了原版exm工具箱缺失的函数,如 `suffer.m` 等,并对新版MATLAB可能出现的不兼容现象作了必要的提示与修正;
- (3)翻译了克利夫的四篇博文作为附录,第一篇介绍MATLAB的起源,并给出了译者配字幕的克利夫相关演讲视频,使读者有机会欣赏大师的风采;第二篇介绍新版的克利夫实验室,即本书扩展的配套工具;第三篇介绍 $\pi$ 的任意精度计算;第四篇通过“21点”游戏深入浅出地介绍并行计算的概念与实现。相信读者通过这些博文的阅读能更好地学习MATLAB语言与编程技术。

薛定宇

东北大学,沈阳



# 前 言

欢迎阅读《MATLAB之父：编程实践》(Experiments with MATLAB)。

MATLAB现如今已是一个羽毛丰满(full-fledged)的科学运算环境,它于20世纪70年代末起源于一个简单的“矩阵实验室”程序。我们也想延续这种实验室传统,将涉及的应用数学、科学运算与MATLAB编程等方面的内容用实验的方式介绍给大家。

我们期望你已经有了中学数学方面关于几何学、代数学和三角函数方面的一些基础知识。我们将引入微积分学、矩阵理论、常微分方程等方面的一些基础的想法,但不要求你已经学习过这些课程。事实上,这些实验是上述课程有意义的补充材料。

我们还期望你有了一些操作计算机的经验,比如说有了文字处理和图表应用方面的基础知识。如果你已经知道关于C或Java这类语言的编程,将对阅读实践本书的内容大有裨益,当然这些预备的知识并不是必需的。我们将用举例的方式来介绍MATLAB语言。所有的这些实践都涉及理解、修改我们已经编好的MATLAB程序和函数。

你应该有权使用MATLAB和我们的exm工具箱(Experiments with MATLAB Toolbox)——为本书编写的一组程序与数据。我们期望你不但能使用这些程序,也能阅读、理解这些程序,修改这些程序,并改善这些程序。exm工具箱就是我们“实验室”中的仪器。

如果你想方便地使用MATLAB、想获得MATLAB学生版软件,请参见:

[http://www.mathworks.com/academia/student\\_version](http://www.mathworks.com/academia/student_version)

想对MATLAB的入门知识与运行机制有基本了解,请看视频:

[http://www.mathworks.com/academia/student\\_version/start.html](http://www.mathworks.com/academia/student_version/start.html)

想获得文档材料,包括入门材料,请访问:

<http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/techdoc/matlab.html>

想获得其他用户贡献的程序、了解程序设计竞赛、链接到世界范围内的MATLAB用户群等,请参见:

<http://www.mathworks.com/matlabcentral>

阅读本书之前,请先下载exm工具箱,用pathtool命令将exm工具箱的路径加载到MATLAB的路径下,并运行exmgui,该命令将产生一个如图0-1所示界面。你

可以单击任一图标来预览实践的内容。(译者注:新版本的 `exm` 工具箱自带安装功能,安装后可以由其 APP 启动图 0-1 中界面,但 `exmgui` 函数已经取消了。)

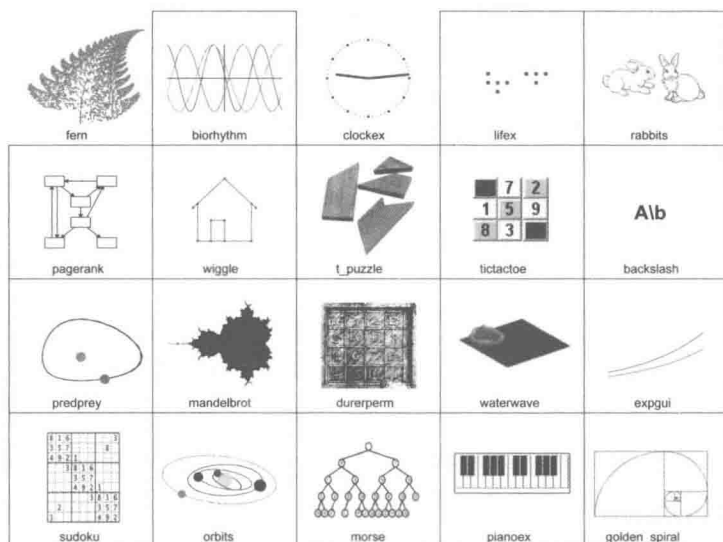


图 0-1 `exmgui` 程序提供了一个进入本书一些实践程序的入口

你可能需要经常使用 MATLAB 的帮助和文档功能。想快速了解名为 `xxx` 的命令和函数,可以给出命令 `help xxx`。想获得关于 `xxx` 的更全面信息,可以使用命令 `doc xxx`。

我们期望你觉得本书的实验是有趣的,你可以通过这样趣味的方式学习使用 MATLAB 语言。每一章都有“要点回放”一节,对应一个 MATLAB 下的可执行程序。比如,如果你想执行“幻方”(magic square)一章的要点回放程序,可以给出命令 `magic_recap`,更好地,给出命令 `edit magic_recap`,然后按下 `Ctrl+Shift+Enter` 键,一个单元一个单元地执行其中的语句。

MATLAB 提供了一个比较新的功能——`publish` 命令,你可以用下面的命令为 `magic_recap` 程序打开一个排版比较美观的网页 `publish magic_recap`。

如果想专心学习 MATLAB,请认真阅读、运行并理解“要点回放”中的内容。

克利夫·莫勒

马萨诸塞州内迪克、新墨西哥州圣达菲

# 目 录

第1章 迭代 (Iteration)	1
第2章 斐波那契数 (Fibonacci Numbers)	15
第3章 日历与时钟 (Calendars and Clocks)	29
第4章 矩阵 (Matrices)	39
第5章 线性方程组 (Linear Equations)	53
第6章 蕨型叶分形 (Fractal Fern)	63
第7章 谷歌的网页排名值 (Google PageRank)	71
第8章 指数函数 (Exponential Function)	85
第9章 T形积木 (T Puzzle)	99
第10章 幻方问题 (Magic Squares)	107
第11章 井字棋的魅力 (TicTacToe Magic)	121
第12章 生命游戏 (Game of Life)	129
第13章 曼德勃罗集 (Mandelbrot Set)	139
第14章 数独 (Sudoku)	157
第15章 常微分方程 (Ordinary Differential Equations)	171
第16章 捕食者与猎物模型 (Predator-Prey Model)	183
第17章 轨道 (Orbits)	189

第18章 浅水方程 (Shallow Water Equations)	205
第19章 摩尔斯电码 (Morse Code)	209
第20章 音乐 (Music)	225
附录A MATLAB的起源 (Origins of MATLAB)	239
附录B 克利夫实验室简介 (Introducing Cleve's Laboratory)	249
附录C $\pi$ 的计算 (Computing $\pi$ )	255
附录D “21点”的MATLAB仿真 (Simulating Blackjack with MATLAB)	263

## 第1章 迭代 (Iteration)

迭代是科学运算中很关键的元素。本章以“黄金分割”为例介绍MATLAB的赋值语句,并介绍for、while循环及plot绘图函数。

选择任意的数值,用下面语句将其输入MATLAB环境

```
x = 你选择的数值
```

这是一条MATLAB的赋值语句 (assignment statement)。你选择的数值存入了 $x$ 变量 (variable),以后也可以使用。例如,你给出命令 (译者注:在这里加了MATLAB命令行的提示符 $\gg$ ,该提示符是MATLAB命令窗口自动生成的,你可以在提示符下输入你的命令)。

```
 $\gg$  x = 3
```

则MATLAB给出下面的响应

```
x =  
3
```

下一步,再给出语句

```
 $\gg$  x = sqrt(1 + x)
```

简写词sqrt是MATLAB求平方根函数的函数名。该语句计算出右侧的 $\sqrt{1+x}$ 量,运算结果存入 $x$ 变量, $x$ 变量原来的值将由新值覆盖。

你可以在计算机键盘的右下角部分看到四个箭头键,这些键是命令行编辑 (command line editing)使用的键,向上的箭头键允许你回调以前给出的命令,包括上次运行使用的命令。如果使用向上的箭头键,则可以调用上一个语句,再按下回车键,可以迭代或重复执行下面的语句

```
 $\gg$  x = sqrt(1 + x)
```

如果选择 $x$ 变量的初始值为 $x = 3$ ,则迭代运行上面的命令将得出如下的结果 (译者注:为排版效果紧凑起见,我们删除掉了不必要的空行,并将变量名与其值在同一行显示,下同。)

```
x = 3
x = 2
x = 1.7321
x = 1.6529
x = 1.6288
x = 1.6213
x = 1.6191
x = 1.6184
x = 1.6181
x = 1.6181
x = 1.6180
x = 1.6180
```

这些数值分别为 $3, \sqrt{1+3}, \sqrt{1+\sqrt{1+3}}, \sqrt{1+\sqrt{1+\sqrt{1+3}}}, \dots$ 。10步迭代之后,得出的值固定在1.6180。也可以试用其他的初始值,如果你有计算器也可以在计算器上试。你将发现,无论你从什么值开始,在十几步内都将收敛到1.6180(如果你选择的初始值过大,可能得再多迭代几步)。

MATLAB在执行过程中保持16位有效数字,但只显示5位有效数字。如果给出下面的命令

```
>> format long
```

并重复上述的语句,则从初值 $x = 3$ 开始,经过30步迭代,将显示

```
x = 3
x = 2
x = 1.732050807568877
x = 1.652891650281070
    ....
x = 1.618033988749897
x = 1.618033988749895
x = 1.618033988749895
```

经过大约30步迭代,显示结果就不再变化了。通过这条语句的迭代,你就计算出了数学上最著名的数值之一—— $\phi$ ,该值又称为黄金分割比(golden ratio)。

MATLAB和其他程序设计语言一样,用等号表示赋值运算。赋值语句的执行过程是将等号右边的数值计算出来,存储到等号左边的变量名中。赋值语句

```
>> x = sqrt(1 + x)
```

利用变量 $x$ 的当前值,将 $\text{sqrt}(1+x)$ 计算出来,并将结果存回到变量 $x$ 中。

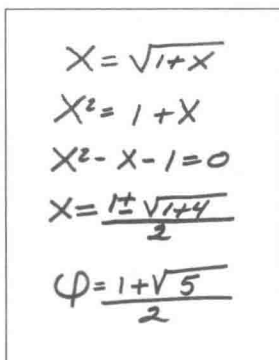
在数学上,等号的含义与此不同

$$x = \sqrt{1+x}$$

是一个方程 (equation), 该方程的解称为固定点 (fixed point)。

函数  $f(x) = \sqrt{1+x}$  只有一个固定点。求解该方程最好的方法是避免使用计算机, 直接采用一元二次方程的求根公式求解。如果想手工求解该方程, 则可以参考图 1-1 中的手工推导过程, 该二次方程的正根为黄金分割比

$$\phi = \frac{1 + \sqrt{5}}{2}$$



$$\begin{aligned} x &= \sqrt{1+x} \\ x^2 &= 1+x \\ x^2 - x - 1 &= 0 \\ x &= \frac{1 \pm \sqrt{1+4}}{2} \\ \phi &= \frac{1 + \sqrt{5}}{2} \end{aligned}$$

图 1-1 手工计算方程的固定点

你也可以用下面的 MATLAB 语句直接求解  $\phi$  的值。

```
>> phi = (1 + sqrt(5))/2
```

在 format long 显示格式下, 也可以得出与迭代过程完全一样的结果

```
phi = 1.618033988749895
```

图 1-2 是 MATLAB 绘图的第一个例子: 该图显示了曲线  $y = x$  与  $y = \sqrt{1+x}$  的交点。

由下面的语句可以生成一个从 -1 出发, 到 4 结束且步距为 0.02 的 x 向量

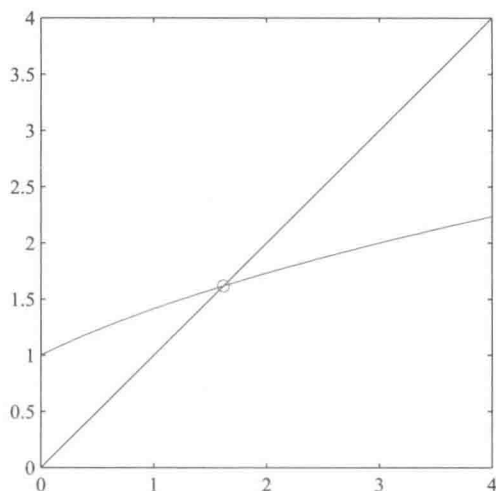
```
>> x = -1:.02:4;
```

下面的语句将绘制出有三个元素的图形

```
>> y1 = x; y2 = sqrt(1+x);
plot(x,y1,'-',x,y2,'-',phi,phi,'o')
```

前两个元素为  $x$  和  $\sqrt{1+x}$  的曲线, 在绘图语句 plot 中, 选项 '-' 绘制的是实线。图形的最后一个元素是由 'o' 选项绘制的点标记, 用圆圈表示。

MATLAB 下 plot 函数有各种各样的调用格式, 包括由其指定颜色和线型, 可以用下面的命令查询更多的可能调用格式

图 1-2  $\phi = 1.6180$  处的固定点

```
>> help plot
```

黄金分割在数学中很多地方都出现过,本书也将多次提及。黄金分割比的名字来源于如图 1-3 所示的“黄金矩形”,其性质为,该矩形移除一个边长为 1 的正方形后,剩下的小矩形的形状与原矩形完全一致,矩形长宽的比值正好为  $\phi$  值。

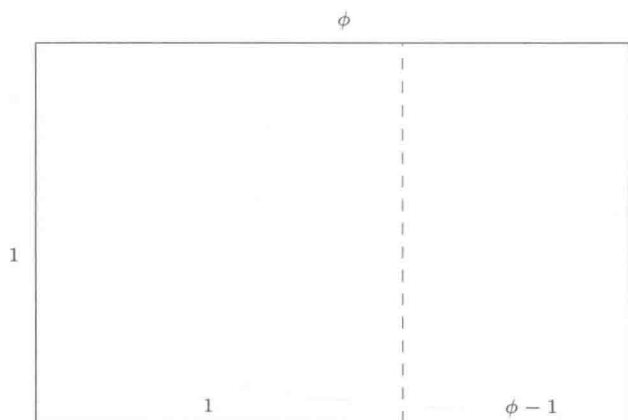


图 1-3 黄金矩形

$$\frac{1}{\phi} = \frac{\phi - 1}{1}$$

方程两边同时乘以  $\phi$  将得一元二次方程,该方程与求解固定点时得出的方程完全一致。

$$\phi^2 - \phi - 1 = 0$$



前面介绍的用向上箭头键的操作方法适合于执行单条语句,或执行由逗号或分号分隔的几条语句,解决这样问题更好的方法是使用 `for` 或 `while` 循环结构,该结构可以若干次反复执行同一段语句,例如

```
>> x = 3
    for k = 1:31, x = sqrt(1 + x), end
```

语句段将产生 32 条输出信息,第一条信息是由初始值赋值语句产生的,其余的信息是由 `for` 循环结构产生的。

`while` 循环结构可以执行一个语句段落若干次,且次数可以是未知的,循环结构是否结束由逻辑表达式为 `true` (真) 或为 `false` (伪) 来控制。下面给出固定值迭代的最简单 `while` 循环表示。

```
>> x = 3
    while x ~= sqrt(1 + x)
        x = sqrt(1 + x)
    end
```

和 `for` 循环一样,这段语句也将产生 32 条输出信息。然而这段代码可能有两个方面会引起诟病。

第一个方面,这里采用的循环结束条件,逻辑表达式 `x ~= sqrt(1+x)` 是数学表达式  $x \neq \sqrt{1+x}$  的 MATLAB 表示。在精确计算中,当  $x$  值不等于  $\sqrt{1+x}$  时成立,所以严格说来该条件永远都成立,该循环会一直进行下去。

事实上,和大多数计算机语言一样, MATLAB 并不是严格执行精确的运算。为了使计算时间和存储空间都得到经济地利用, MATLAB 语言采用浮点数的运算方法,所以这两个表达式  $x$  和  $\sqrt{1+x}$  会在浮点数意义下相等,从而结束循环。判定两个浮点数是否相等是一个很微妙的事情,在这个例子中是可以直接这样判定的,但在更复杂的情况下这样的判定方法并不合适。

第二个方面是这里的简单 `while` 循环的效率不高,在每步循环中计算了两次 `sqrt(1+x)`。

所以应该改写上述的程序来避免这两个诟病。

```
>> x = 3, y = 0;
    while abs(x-y) > eps(x)
        y = x; x = sqrt(1+x)
    end
```

赋值语句末尾的分号表示该语句的结果不显示出来。函数 `eps(x)` 表示在  $x$  附近的浮点数精度误差限,在数学上经常使用希腊字母  $\epsilon$  或英文单词 `epsilon` 来表示一个“很小”的量。这里关于循环语句的新程序段落每次迭代只求一次平方根,但代价