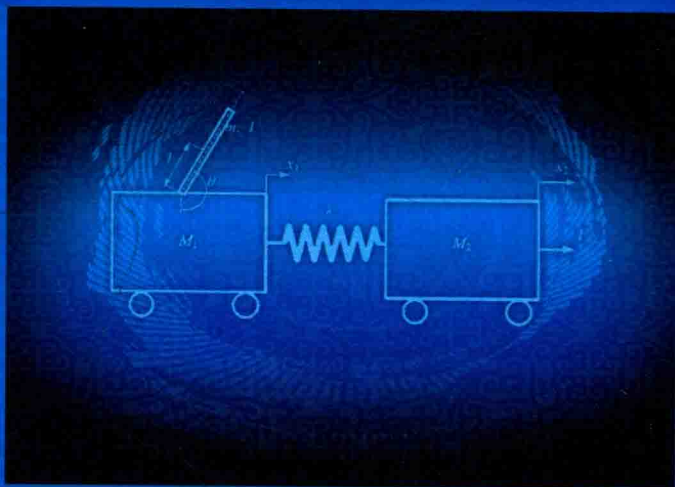


“十三五”普通高等教育规划教材

控制系统仿真

叶宾 赵峻 李会军 王法广 编著



含电子教案

<http://www.cmpedu.com>



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



“十三五”普通高等教育规划教材

控制系统仿真

叶 宾 赵 峻 李会军 王法广 编著



机械工业出版社

本书以 MATLAB 和 Simulink 仿真软件为主要工具,介绍了自动控制系统、电子电路和电力电子系统的计算机仿真基础知识及应用。全书内容围绕电气控制系统的建模、分析与计算机辅助设计,通过大量示例,循序渐进地介绍了 MATLAB 和 Simulink 的基础知识、基于数学模型的控制系統仿真、基于物理仿真框架的系统仿真技术以及虚拟现实技术等。

本书可以作为高等院校自动化、电气工程及其自动化、测控技术与仪器等专业本科生的教材,也可供自动控制及相关领域的工程技术人员参考。

本书配套授课电子课件,需要的教师可登录 www.cmpedu.com 免费注册,审核通过后下载,或联系编辑索取(QQ: 308596956, 电话: 010 - 88379753)。

图书在版编目(CIP)数据

控制系统仿真/叶宾等编著. —北京:机械工业出版社, 2017.5

“十三五”普通高等教育规划教材

ISBN 978-7-111-56698-4

I. ①控… II. ①叶… III. ①自动控制系统 - 系统仿真 - 高等学校 - 教材 IV. ①TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 091291 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 汤 枫 责任编辑: 汤 枫

责任校对: 张艳霞 责任印制: 常天培

唐山三艺印务有限公司印刷

2017 年 6 月第 1 版 · 第 1 次印刷

184mm × 260mm · 11 印张 · 157 千字

0001 - 3000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-56698-4

定价: 35.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线: (010) 88379833

读者购书热线: (010) 88379649

封面无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网: www.cmpbook.com

机工官博: weibo.com/cmp1952

教育服务网: www.cmpedu.com

金书网: www.golden-book.com

前 言

仿真科学与技术已经成为与理论研究、实验研究并行的人类认识世界的重要方法之一。在解决工程和非工程领域复杂问题的过程中,系统仿真技术发挥着不可或缺的作用。

MATLAB 语言和 Simulink 仿真环境以其强大的数学运算能力、语言的高度集成性和方便的绘图功能,在自动控制领域的教学研究中得到广泛应用,已成为系统仿真、自动控制、电气工程等领域首选的计算机软件工具。本书围绕自动控制系统、电机及其控制、电力电子装置等学科领域,以 MATLAB 和 Simulink 为仿真开发环境,先后介绍了系统建模、数值分析和计算机辅助设计、虚拟现实技术等。

全书共 7 章。第 1 章介绍了计算机仿真技术的发展概况;第 2 章介绍了 MATLAB 和 Simulink 仿真开发环境的基础知识;第 3 章主要介绍系统建模,以及控制系统中的模型转换等;第 4 章介绍了常用的连续系统离散化方法,重点讲解了 PID 控制器和状态反馈极点配置的 MATLAB 辅助设计方法;第 5 章和第 6 章分别介绍了 Simulink 在电子电路和电机控制系统仿真中的应用;第 7 章介绍使用 Simulink 进行虚拟现实的开发。附录部分提供了 8 个实验,供上机实验使用,其中前 4 个实验为学习 MATLAB 和 Simulink 的基础知识而设置,后 4 个实验为学习 MATLAB 和 Simulink 系统仿真而设置。书中实例均在 MATLAB R2014a 版本上进行了仿真验证。

本书由中国矿业大学信息与控制工程学院叶宾、赵峻、李会军和王法广编写。其中,第 1、4 两章由赵峻编写,第 2 章由王法广编写,第 3、5、6、7 章由叶宾编写。全书由叶宾和李会军负责统稿。

本书在编写过程中,得到了中国矿业大学信息与控制工程学院王雪松教授、常俊林副教授的建议和支持,并且提出了许多宝贵的意见,在此表示深深的感谢。中国矿业大学研究生鞠晨、郭阳全、刘鹏等几位同学协助进行了许多仿真模型的开发

和验证工作，在此表示诚挚的感谢。本书的编写和出版工作得到了江苏省高校品牌专业建设工程项目资助，在此一并表示感谢。

由于编者水平有限，书中难免存在缺点和错误，殷切希望广大读者批评指正。

编 者

目 录

前言	
第 1 章 绪论	1
1.1 仿真技术简介	1
1.2 仿真研究的步骤	5
1.3 仿真技术的应用及发展	6
1.4 习题	8
第 2 章 MATLAB/Simulink 基础	
知识	9
2.1 MATLAB 语言基础	9
2.1.1 MATLAB 开发环境	9
2.1.2 数据结构	11
2.1.3 矩阵及其计算	13
2.1.4 符号运算	17
2.2 MATLAB 语言程序设计	24
2.2.1 建立 M 文件	24
2.2.2 结构语句	25
2.2.3 其他常用命令	27
2.3 数据可视化	27
2.3.1 二维图形	27
2.3.2 三维图形	33
2.4 Simulink 仿真环境	34
2.4.1 建立 Simulink 仿真模型	35
2.4.2 Simulink 基本操作	35
2.4.3 参数设置	36
2.4.4 子系统封装	40
2.5 习题	43
第 3 章 控制系统的数学模型	44
3.1 常用数学模型的 MATLAB 表示及转换	44
3.1.1 连续系统模型	44
3.1.2 离散系统模型	46
3.1.3 模型的转换	47
3.2 线性系统的实验建模法	48
3.2.1 最小二乘法原理	49
3.2.2 基于 MATLAB 的最小二乘法模型辨识	51
3.2.3 由响应曲线识别一阶延迟模型	54
3.3 一级倒立摆的机理建模	55
3.4 习题	60
第 4 章 自动控制系统的 MATLAB 仿真	61
4.1 连续系统的离散化	61
4.1.1 常用离散化方法	61
4.1.2 数值积分方法的计算稳定性	74
4.1.3 应用 ODE 算法的仿真实现	77
4.2 PID 控制器的设计与仿真	83

4.2.1 连续 PID 控制器的设计与仿真	83	仿真	135
4.2.2 离散 PID 控制器的设计与仿真	90	6.4 PWM 变频器 - 交流异步电动机系统的仿真	136
4.2.3 PID 控制器参数整定	92	6.5 习题	140
4.3 MATLAB 的控制系统工具箱应用	99	第 7 章 虚拟现实技术	141
4.4 基于状态空间模型的控制器设计	102	7.1 V - Realm Builder 软件简介	142
4.4.1 状态反馈	102	7.2 创建一个立方体的虚拟场景	143
4.4.2 极点配置	103	7.3 质量块 - 弹簧振荡系统的虚拟现实仿真	149
4.5 习题	106	7.3.1 创建质量块 - 弹簧振荡系统的虚拟场景	149
第 5 章 电子电路的建模和仿真 ...	109	7.3.2 创建虚拟场景动画的 Simulink 模型	154
5.1 Simscape 模型库简介	109	7.4 习题	159
5.2 模拟 PID 控制器的建模与仿真	118	附录 实验指导书	160
5.3 习题	119	实验一 MATLAB 基础	160
第 6 章 电力电子及电机拖动系统的 Simscape 仿真	123	实验二 MATLAB 数值运算和符号运算	161
6.1 单相不可控整流电路的 Simscape 仿真	123	实验三 程序设计	162
6.1.1 单相不可控整流电路仿真实例	123	实验四 基本绘图	163
6.1.2 PowerGUI 的使用	126	实验五 连续系统的仿真	164
6.2 三相桥式全控整流电路的 Simscape 仿真	129	实验六 非线性系统的仿真	165
6.3 直流调速系统及其仿真	132	实验七 模型近似与 PID 控制器设计	165
6.3.1 直流电动机开环调速系统的仿真	132	实验八 模拟电路的 Simscape 仿真	166
6.3.2 直流电动机单闭环调速系统的仿真	135	参考文献	167

第1章 绪 论

1.1 仿真技术简介

仿真是一种用相似的模型或设备来模仿某个环境或系统行为的技术。仿真所遵循的基本原则是相似原理（几何相似或性能相似）。依据这一原理，仿真可分为物理仿真、数学仿真和半实物仿真。

物理仿真，即按照真实系统的物理性质构造系统的物理模型，并在物理模型上进行实验的过程。例如，在船舶设计制造中，常常按一定的比例尺缩小建造一个船舶模型，然后将其放置在水池中进行各种动态性能的实验研究。物理模型的特点是直观、形象；其缺点是模型改变困难，实验限制多，投资较大。在计算机问世之前，基本上是物理仿真。

数学仿真，就是应用性能相似原理，将实际系统的运动规律用抽象的数学形式表达出来，然后在计算机上通过求解这些数学模型来进行实验研究的过程，所以有时也称为计算机仿真。例如，在计算机上使用 MATLAB 软件，模拟倒立摆及其控制系统，根据模拟运行曲线，修改控制器参数，以达到好的控制效果。数学仿真较为经济、灵活、方便、效率高，但是受限于系统建模技术。

半实物仿真是将数学模型与物理模型（甚至实物）联合起来进行实验。对系统中比较简单的部分或对其规律比较清楚的部分建立数学模型，并在计算机上加以实现；而对比较复杂或规律尚不十分清楚的部分，由于建模比较困难，则采用物理模型或实物。仿真时将二者连接起来，完成整个系统的实验。

随着计算机技术的飞速发展，计算机仿真越来越多地取代了物理仿真。为了对计算机仿真有一个更加全面的了解，下面通过一个简单的例子来说明。

例 1-1 汽车乘坐舒适性直接体现在汽车减震缓冲装置性能的好坏，而汽车减震缓冲装置类似一种常见的机械振动系统——质量 - 弹簧 - 阻尼器系统，如图 1-1 所示。对于该系统，需要确定在其他参数已知的情况下，单位阶跃响应不发生振荡时，阻尼系数的取值范围。

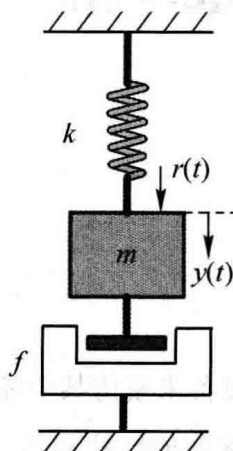


图 1-1 质量 - 弹簧 - 阻尼器系统

1) 为了仿真研究这一系统，首先要建立其数学模型。取作用在质量块上的力 $r(t)$ 为输入变量，质量块的位移 $y(t)$ 为输出变量。根据牛顿运动定律，描述该系统的动态数学模型为

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + f \frac{dy}{dt} + ky = r$$

式中， m 、 f 、 k 分别表示质量块的质量、阻尼器的阻尼系数以及弹簧的弹性系数。这是一个二阶常系数线性微分方程，为了方便在计算机上求解，将其转换为状态空间描述形式

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k}{m} & -\frac{f}{m} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{1}{m} \end{pmatrix} r \\ y &= (1 \quad 0) \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

2) 对于上面的状态空间描述形式仍然不能直接编程用计算机求解，因此必须将其转换成适宜于编程并能在计算机上进行迭代求解的离散模型——仿真模型。设计算步长为 T ，应用差商代替导数项，即可得到已知初值进行迭代求解的

离散方程形式

$$\begin{pmatrix} x_1((n+1)T) \\ x_2((n+1)T) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1(nT) \\ x_2(nT) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k}{m} & -\frac{f}{m} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1(nT) \\ x_2(nT) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{1}{m} \end{pmatrix} r(nT) \Bigg] T$$

$$y[(n+1)T] = x_1[(n+1)T]$$

3) 应用算法语言编写计算机程序，并进行调试。假设质量 $m = 1$ ，弹簧弹性系数 $k = 4$ ，研究阻尼系数 f 的取值对系统的影响。采用 MATLAB 语言编程如下：

```
% Ch1code1.m
clear all
clc
m = 1;k = 4; % 质量系数 m 值,弹簧弹性系数 k 值
x = [0;0]; % 置状态变量初值
Y = 0;t = 0; % 置输出列向量 Y 初值,时间列向量 t
% 初值
T = 0.01;Tf = 10;r = 1; % 置计算步距值,仿真时间值和外力值
f = input('f = '); % 从键盘输入阻尼系数 f 值
A = [0 1; -k/m -f/m];B = [0;1/m];C = [1 0]; % 状态方程矩阵
for i = 1:Tf/T
    x = x + (A * x + B * r) * T; % 计算离散状态方程
    y = C * x; % 计算输出方程
    Y = [Y;y];
    t = [t;i * T];
end
plot(t,Y)
```

4) 取不同的阻尼系数 f 值 ($f = 5, 2, 3, 3.5$)，在计算机上进行仿真实验，并对仿真结果进行分析，如图 1-2 所示。对于 $f \in [2, 5]$ ，反复进行实验，可以得出 $f \approx 3.5$ 为临界值。当 $f > 3.5$ 时，系统不会出现振荡现象。

从例 1-1 可以看到，仿真涉及三个部分：一是实际系统；二是数学模型；三是计算机。也即控制系统仿真的三个要素：系统、模型和计算机。系统是研

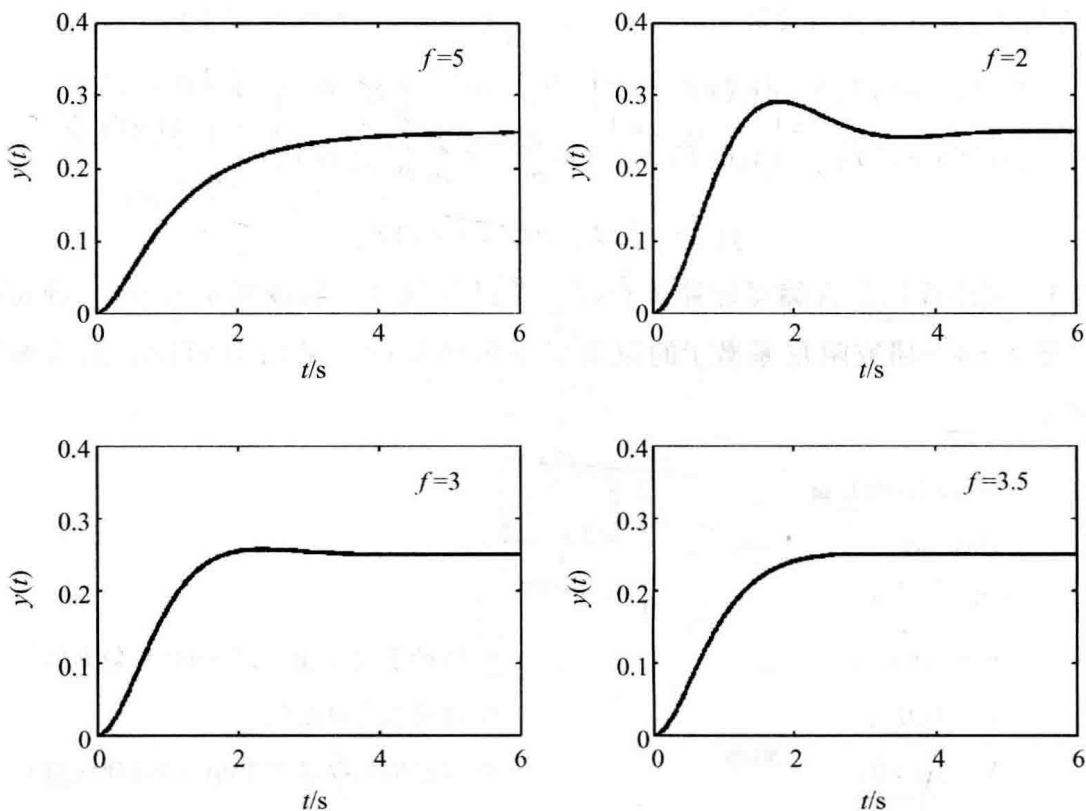


图 1-2 质量 - 弹簧 - 阻尼器对应不同阻尼 f 时的响应曲线

究的对象，模型是系统的抽象，计算机则是仿真的工具和手段。这里涉及两次模型化：第一次是将实际系统变为数学模型；第二次是将数学模型变成仿真模型。通常将一次模型化的技术称为系统建模，二次模型化则称为系统仿真技术，两者虽有十分密切的联系，但仍有所区别。系统建模技术是研究系统与数学模型之间的关系，而系统仿真技术是研究数学模型与计算机之间的关系，如图 1-3 所示。

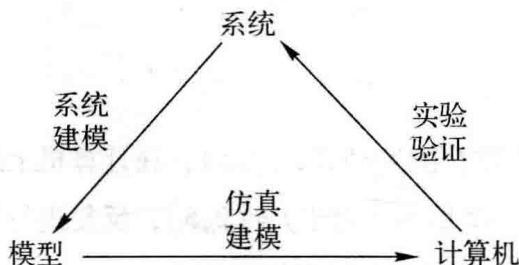


图 1-3 系统、模型和计算机三者之间关系

1.2 仿真研究的步骤

通过上一节的例子，可以看出在进行计算机仿真时，一般需要进行下面几个步骤，如图 1-4 所示：

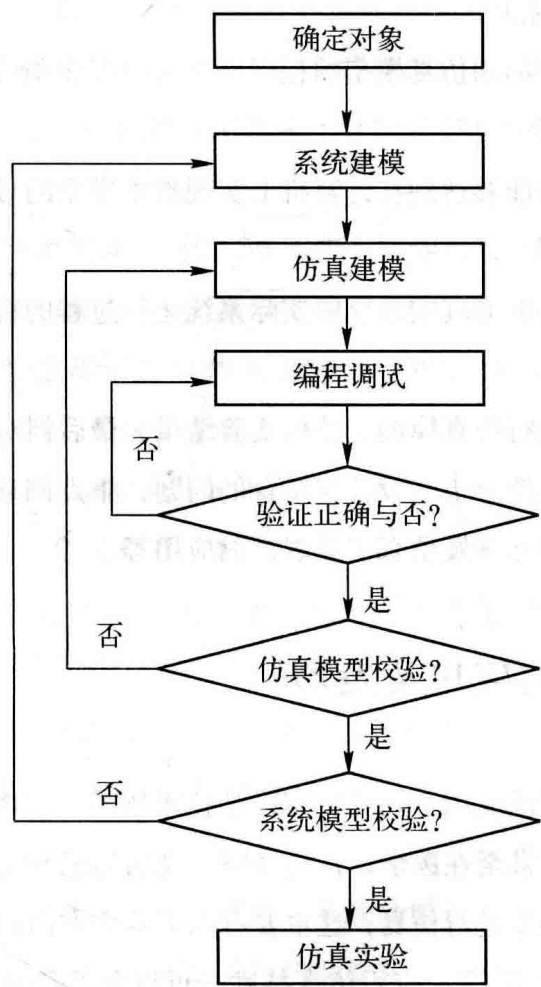


图 1-4 系统仿真流程图

(1) 确定仿真研究的对象

分析实际系统，阐述问题，给出仿真研究的具体对象。

(2) 建立系统的数学模型

对实际系统进行简化或抽象，应用机理建模法、实验建模法或混合建模方法，基于相似性原理，对系统的行为、特征等用数学的形式进行描述，即所谓的

一次建模。

(3) 建立系统的仿真模型

将数学模型通过一些数值分析方法转变成能在计算机上运行的离散数学模型，即二次建模。这一步非常关键，选用的数值分析方法不同，运行的稳定性、精度以及速度也不同，甚至会导致错误的实验结果。

(4) 编制程序并调试

应用程序设计语言编制仿真模型的程序，并进行程序调试。

(5) 仿真模型校验

检验仿真模型是否能够达到在计算机上实现数学模型的目的。

(6) 系统模型校验

检验系统模型是否能够真实地反映实际系统运行过程的特性。

(7) 进行仿真实验

包括实验设计、运行仿真模型、分析实验结果，最后针对问题得出结论。

本书将围绕控制系统分析、设计与综合的问题，重点阐述仿真模型的建立，包括介绍各种仿真算法的原理及仿真工具软件的应用等。

1.3 仿真技术的应用及发展

目前仿真技术已广泛应用于几乎所有科学技术领域，如电力、冶金、机械、航空和航天等行业领域，甚至在医学、社会经济、交通运输和生态系统等非工程领域都有应用。那么为什么要进行仿真，这主要有以下几个方面的原因：

1) 系统还处于设计阶段，应用仿真技术，可以预测待建系统的性能，检验其是否可以达到设计要求。可以比较不同设计方案的优劣，以得到最优性能指标的系统。

2) 在实际系统上进行试验代价太高、比较危险或难以实现，比如核爆炸试验、导弹飞行试验、宇宙飞船登月试验和大坝安全性试验等；又如，在化工系统中，常常需要研究某个参数对产品质量的影响，但若直接修改参数，可能会导致一炉或整个反应釜产品报废。

3) 由于实际系统的复杂性，影响结果的因素众多，如果直接在实际系统上研

究某个因素变化对系统的影响，很难保证其他因素不变，因而无法判断试验结果到底是否是由特定因素引起的。

4) 有的实际系统运行时间太长，比如酿酒需要很长时间；而有的时间又太短，比如核反应试验。而采用仿真的方法可以调整时长，加快或者缩短进程。

那么，根据仿真应用目的的不同，可以将仿真技术分为三大类：第一类是用于系统分析、设计、综合方面；第二类是用于人员训练与教育方面，比如飞行员训练、驾驶员训练，还有电站、电网、化工设备等操作人员的岗前培训等；第三类是用于技术咨询和预测方面，如模拟专家思考、分析和判断的专家系统，地震预测系统，气象模拟预测等。

仿真学科形成于 20 世纪 40 年代，50 年代中期随着数字计算机的出现，数字仿真开始出现并在以后的一段时间内迅速得到发展。60 年代至 70 年代，出现了大量的数字仿真语言，大大普及了数字仿真的应用。1955 年，国际模拟计算机协会 (IAAC) 成立，1976 年改为国际仿真数学与仿真计算机协会 (International Association for Mathematics and Computers in Simulation, IAMCS)，我国也于 1988 年成立了系统仿真学会。随着高性能工作站、网络技术、计算技术、软件技术和人工智能技术的发展，仿真技术也得到了飞速发展。仿真技术的发展趋势主要有以下几个方面：

1) 在硬件方面，基于多 CPU 处理系统的并行仿真技术，可有效提高系统仿真的速度，从而使得仿真的“实时性”得到加强。

2) 由于网络技术的不断完善与提高，对于那些复杂的大型系统的仿真问题，在单台计算机很难完成的情况下，可以将大系统分成若干个小的子系统，分别在网络上不同的计算机上运行，通过网络进行信息交换，进而达到信息共享，可以整合各种资源，甚至集合国际领域内的专家共同完成世界难题的研究工作。

3) 在算法方面，随着科学研究和大量实时仿真需求的增长，仿真算法正向快速、并行化方向发展。

4) 在应用软件方面，早期就出现了众多著名的数学软件包，如美国的基于特征值的软件包 EISPACK 和线性代数软件包 LINPACK、英国牛津数值算法研究组 (Numerical Algorithm Group) 开发的 NAG 软件包，这些软件包大都是由 FORTRAN 语言编写的。这些程序包使用起来极其复杂。1967 年由国际仿真委员会通

过了仿真语言规范，之后便出现了诸如 CSMP、ACSL、SIMNON 等仿真语言，但随着 MATLAB 语言的出现和逐步完善，这些语言都销声匿迹了。目前，仿真语言向着更加方便、更加完美的方向发展，使得使用者不必考虑算法如何实现，而只需专注于解决自己特定的问题即可。

5) 与虚拟现实技术融合，建立一个多维化的信息空间，使得系统仿真结果在表现形式上更加逼真、形象。例如，可以“制造”各种机械部件、设备、车辆甚至飞行器的“虚拟样机”，而后在“样机”上进行各种动静态性能测试，进而能够快速且持续不断地进行优化和完善，最终能够直接投入生产。

1.4 习题

1. 使用搜索引擎，以关键词“仿真”“模拟”进行搜索，整理相关资料，理解并比较这些词语含义的差别。
2. 列举出一些用于系统仿真的计算机软件，它们分别用于哪些行业或领域？
3. 使用搜索引擎，查找与计算机仿真技术相关的国内外期刊及学术会议。
4. 控制系统计算机仿真的步骤是什么？
5. 什么是系统模型？什么是仿真模型？二者有什么异同？
6. 试举几个例子，说明通过仿真能解决什么问题。

第2章 MATLAB/Simulink 基础知识

1980年,美国新墨西哥州大学计算机系 Cleve Moler 博士在给 学生讲授线性代数课程时,为了减轻学生的负担,采用当时用于数学计算的高级语言,编写了供学生使用的与其有关的一系列子程序库的接口程序,后来其建立了 MathWorks 公司,并将这个接口程序取名为 MATLAB (即 Matrix Laboratory 的前三个字母的组合,意为“矩阵实验室”)。经过 30 余年的补充、研究与不断完善以及多个版本的升级换代,现已成为国际上最为流行的科学计算与工程计算软件之一。

现在的 MATLAB 已经不仅仅是一个最初的“矩阵实验室”了,它已发展成为一种具有广泛应用前景、全新的计算机高级编程语言。自 20 世纪 90 年代以后,在美国和欧洲大学中,已将 MATLAB 正式列入研究生、本科生的教学计划,成为学生所必须掌握的基本软件之一。在研究单位和工业界, MATLAB 也成为工程师们必须掌握的一种工具,被认作进行高效研究与开发的首选软件工具。

MATLAB 还拥有很多用于解决不同领域专业问题的程序集,称为工具箱 (Toolbox)。目前已有涉及自动控制、信号处理、图像处理、经济、数学等多种学科的 30 多种。工具箱提供了许多函数文件,用户可自行调用与修改,极大地方便了科研工作者。

本章将介绍 MATLAB 软件基础,让读者初步了解 MATLAB 的基础功能。

2.1 MATLAB 语言基础

2.1.1 MATLAB 开发环境

MATLAB 开发环境是一套方便用户使用的 MATLAB 函数文件的工具集,是一

款集成多种编程手段的软件。它主要包括命令窗口、M 文件编辑调试器、MATLAB 工作空间和 Simulink 等。

1) 命令窗口：命令窗口是 MATLAB 提供给用户的操作界面，在命令窗口中，用户可以实现 MATLAB 的各种功能。

2) M 文件编辑调试器：M 文件是使用 MATLAB 编程语言所编写的程序文件，而编辑器则是 MATLAB 软件为用户提供的用于编辑 M 文件的环境。

3) MATLAB 工作空间：它显示用户在 MATLAB 中进行变量操作的结果，主要负责数据的存储。

4) Simulink：其提供了图形化编程功能模块与编程环境，更适用于对复杂系统的分析与设计。

打开 MATLAB 将看到其主窗口中的命令行窗口如图 2-1 所示，它是用户和 MATLAB 进行交互的主要窗口。

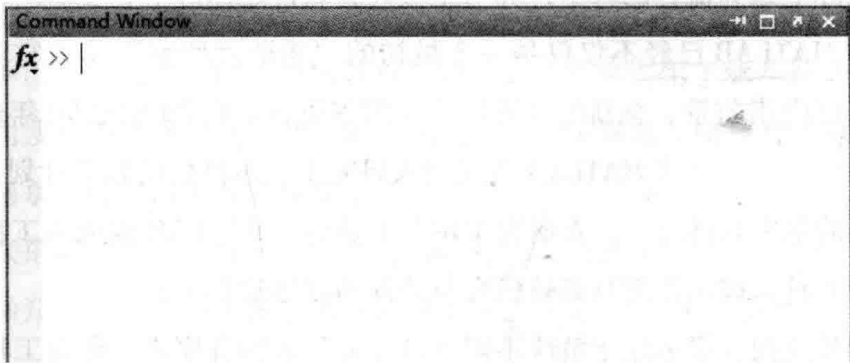


图 2-1 Command 窗口

在该窗口中可输入命令和进行计算，如：

```
>> A = [12,1,3,10;5,2,15,7;4,2,5,14;6,7,9,31]
```

回车后将对该行中的命令进行运算，其结果将保存在 Workspace 中，如图 2-2 所示。

鼠标左键双击图 2-2 中变量 A，即可看到图 2-3 所示的 A 元素值。

图 2-3 中每个元素均可通过鼠标单击选中，然后进行修改。Workspace 中的数据是内存中的数据，不会保存在硬盘上。单击图 2-2 中界面上的保存按钮可将数据存储于硬盘中，其保存格式为 .mat 格式。