

普通高等教育“十三五”精品规划教材

# 计算机仿真技术 ——基于MATLAB的机械工程设计

主编 ◎ 郑建校 贺利乐

主审 ◎ 段志善



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

十三五”精品规划教材

# 计算机仿真技术

——基于 MATLAB 的机械工程设计

主编 郑建校 贺利乐

主审 段志善



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

按照机械工程类专业应该掌握的计算机仿真技术要求,本书介绍了常用的计算机仿真软件,主要讲述以具有强大计算和绘图能力的计算机仿真软件——MATLAB 软件。全书共分为 10 章,包括 MATLAB 语言的基础知识和基本运算,MATLAB 在高等数学中的应用,MATLAB 在机械工程中的应用,MATLAB 在信号处理中的应用,MATLAB 在自动控制原理中的应用,MATLAB 在液压系统设计中的应用,MATLAB 在机电一体化系统设计中的应用,MATLAB 在电子电路中的应用和 Simulink 的应用等内容。书中给出了大量算例,比照这些算例,可以帮助学生应用 MATLAB 软件解决机械工程类课程中常见的求解计算和绘图问题,激发学生的学习兴趣,理解计算机仿真技术对将来解决工程设计带来巨大的好处,并引导学生独立思考、自由探索、勇于创新。

本书涉及面较广,可以作为理工科大学学生提高科学计算能力和学习效率的教材和必备工具书,也可以作为相关专业高校师生及技术人员、工程师的教材和实际应用参考书。

图书在版编目(CIP)数据

计算机仿真技术：基于Matlab的机械工程设计 / 郑建校, 贺利乐主编. — 北京：中国水利水电出版社, 2018.9  
ISBN 978-7-5170-6933-1

I. ①计… II. ①郑… ②贺… III. ①计算机仿真—Matlab软件—高等学校—教材 IV. ①TP391.9

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第221831号

|      |                                                                                                                               |
|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 书 名  | 普通高等教育“十三五”精品规划教材<br>计算机仿真技术——基于 MATLAB 的机械工程设计<br>JISUANJI FANGZHEN JISHU——JIYU MATLAB DE JIXIE GONGCHENG SHEJI              |
| 作 者  | 主编 郑建校 贺利乐<br>主审 段志善                                                                                                          |
| 出版发行 | 中国水利水电出版社<br>(北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038)<br>网址:www.waterpub.com.cn<br>E-mail:sales@waterpub.com.cn<br>电话:(010)68367658(营销中心) |
| 经 售  | 北京科水图书销售中心(零售)<br>电话:(010)88383994、63202643、68545874<br>全国各地新华书店和相关出版物销售网点                                                    |
| 排 版  | 北京智博尚书文化传媒有限公司                                                                                                                |
| 印 刷  | 北京建宏印刷有限公司                                                                                                                    |
| 规 格  | 185mm×260mm 16 开本 12.5 印张 312 千字                                                                                              |
| 版 次  | 2018 年 9 月第 1 版 2018 年 9 月第 1 次印刷                                                                                             |
| 印 数  | 0001—1000 册                                                                                                                   |
| 定 价  | 42.00 元                                                                                                                       |

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

# 前 言

随着科学技术和计算机技术的迅速发展,作为系统研究重要手段的计算机仿真技术也已经深入到科学研究的各个领域。针对机械工程专业对学生设计、计算能力要求的不断提高,以及计算机软件的广泛应用,本书结合目前的教学、工程实际和作者多年计算机仿真及其他专业课程教学的讲义,介绍了仿真技术的基本概念、计算机仿真三要素、计算机仿真软件的发展和基于 MATLAB 的仿真软件在机械工程专业中的广泛应用。本书作为机械工程专业骨干课程“计算机仿真技术”配套教材,介绍了机械工程专业学生在产品设计、计算等方面所需要的基础知识算例,简单介绍了计算机仿真技术的算法和软件, MATLAB 在高等数学中的应用, MATLAB 在机械工程中的应用, MATLAB 在信号处理中的应用, MATLAB 在自动控制原理中的应用, MATLAB 在液压系统设计中的应用, MATLAB 在机电一体化系统设计中的应用, MATLAB 在电子电路中的应用和 Simulink 的应用,能够让学生从庞大的编程命令库中掌握本专业所需要的主要基础知识,针对性很强。

本书由郑建校、贺利乐主编,负责全书的统稿、修改、定稿工作。本书由西安建筑科技大学段志善教授主审。在本书写作的过程中,非常感谢我的同事罗丹老师、杨乃兴老师、白志峰老师、郭宝良老师和武小兰老师的工作和他们提出的良好建议。学生张炜、徐中显、王铭艺、张含飞、吕瑞皓、杨晓兵、纪佳伟、索超、李育等参与了编写工作,他们完成了绘图、内容的编排、算例选取和程序代码调试,祝愿他们在以后的工作和生活中一切顺利,祝愿他们取得更大的成绩。

本书的出版得到了西安建筑科技大学择优立项专业建设项目“机械工程”新办专业(项目编号 1609116011)、“车辆工程”新办专业建设项目(项目编号 1609118004)、2016 年度校级教材建设项目(项目编号 6040417026)和西安建筑科技大学基础研究基金(项目编号 6040500860)的大力支持。中国水利水电出版社的有关负责同志对本书的出版给予了大力支持。

本书在写作过程中参考了许多文献,除参考文献中所列的文献以外,还有许多来自于网络,无法一一注明出处,在此向原作者表示感谢!

本书涉及面较广,可以作为相关专业高校师生及技术人员、工程师的教材和实际应用参考书。

由于作者水平有限,书中不妥之处在所难免,敬请各位读者给予指正。

编 者

2018 年 6 月

# 目 录

|       |                      |    |
|-------|----------------------|----|
| 第 1 章 | MATLAB 语言概述 .....    | 1  |
| 1.1   | 系统与系统模型 .....        | 1  |
| 1.1.1 | 系统的概念 .....          | 1  |
| 1.1.2 | 系统研究的方法 .....        | 2  |
| 1.2   | 仿真技术概论 .....         | 3  |
| 1.2.1 | 仿真的概念和分类 .....       | 3  |
| 1.2.2 | 仿真的一般过程 .....        | 4  |
| 1.3   | MATLAB 软件的功能 .....   | 7  |
| 1.4   | MATLAB 软件的应用 .....   | 8  |
| 1.5   | MATLAB 软件的安装 .....   | 8  |
| 1.6   | 计算机仿真技术常用软件介绍 .....  | 18 |
| 1.6.1 | Pro/E .....          | 18 |
| 1.6.2 | SolidWorks .....     | 19 |
| 1.6.3 | MATLAB .....         | 22 |
| 1.6.4 | ANSYS .....          | 24 |
| 1.6.5 | AutoCAD .....        | 27 |
| 1.6.6 | CATIA .....          | 29 |
| 1.6.7 | ADAMS .....          | 32 |
|       | 本章小结 .....           | 33 |
| 第 2 章 | MATLAB 的基本语法 .....   | 34 |
| 2.1   | MATLAB 的基本组成 .....   | 34 |
| 2.2   | MATLAB 语言的特点 .....   | 34 |
| 2.3   | MATLAB 的集成工作环境 ..... | 35 |
| 2.3.1 | 菜单/工具栏 .....         | 36 |
| 2.3.2 | 命令行窗口 .....          | 37 |
| 2.3.3 | 工作区 .....            | 38 |
| 2.4   | MATLAB 的运行方式 .....   | 39 |
| 2.5   | MATLAB 的帮助系统 .....   | 40 |
| 2.5.1 | 纯文本帮助 .....          | 40 |

|                                   |           |
|-----------------------------------|-----------|
| 2.5.2 演示(Demos)帮助 .....           | 40        |
| 2.5.3 帮助导航浏览器 .....               | 41        |
| 本章小结 .....                        | 41        |
| <b>第3章 MATLAB 在高等数学中的应用 .....</b> | <b>42</b> |
| 3.1 MATLAB 在线性代数中的应用 .....        | 42        |
| 3.1.1 线性方程组的解 .....               | 42        |
| 3.1.2 特征方程与特征值 .....              | 44        |
| 3.1.3 向量相关性 .....                 | 45        |
| 3.2 MATLAB 在概率统计中的应用 .....        | 46        |
| 3.2.1 各种统计分布函数 .....              | 46        |
| 3.2.2 离散型随机变量的概率及概率分布 .....       | 47        |
| 3.2.3 连续型随机变量的概率及其分布 .....        | 51        |
| 3.3 MATLAB 在神经网络中的应用 .....        | 54        |
| 3.3.1 神经网络的基本概念 .....             | 54        |
| 3.3.2 BP 神经网络 .....               | 55        |
| 3.3.3 径向基函数网络 .....               | 56        |
| 3.3.4 反馈网络 .....                  | 58        |
| 3.4 MATLAB 在复变函数中的应用 .....        | 59        |
| 3.4.1 复矩阵的生成 .....                | 59        |
| 3.4.2 复数的运算 .....                 | 59        |
| 3.4.3 复变函数的极限、导数和积分 .....         | 60        |
| 3.4.4 复变函数的泰勒展开 .....             | 61        |
| 3.4.5 复变函数的图像 .....               | 62        |
| 本章小结 .....                        | 62        |
| <b>第4章 MATLAB 在机械工程中的应用 .....</b> | <b>63</b> |
| 4.1 MATLAB 在材料力学中的应用 .....        | 63        |
| 4.2 螺栓的校核 .....                   | 71        |
| 4.2.1 失效形式和计算准则 .....             | 71        |
| 4.2.2 受拉螺栓连接分析 .....              | 71        |
| 4.2.3 受剪的铰制孔用螺栓 .....             | 72        |
| 4.3 轴的校核 .....                    | 74        |
| 4.4 齿轮校核 .....                    | 78        |
| 本章小结 .....                        | 79        |
| <b>第5章 MATLAB 在信号处理中的应用 .....</b> | <b>80</b> |
| 5.1 信号在 MATLAB 中的表示 .....         | 80        |
| 5.2 信号在 MATLAB 中的数学变换 .....       | 82        |

|              |                                    |            |
|--------------|------------------------------------|------------|
| 5.3          | 利用窗函数法设计 FIR 数字滤波器 .....           | 86         |
| 5.4          | MATLAB 小波变换工具箱的应用 .....            | 89         |
| 5.4.1        | 小波工具箱的介绍 .....                     | 89         |
| 5.4.2        | 小波工具箱在分析一维连续小波中的应用 .....           | 89         |
| 5.5          | 应用 MATLAB 小波变换进行信号去噪 .....         | 92         |
| 5.6          | 利用小波分析分离信号中的不同成分 .....             | 93         |
| 5.7          | MATLAB 在信号分析中应用的实例 .....           | 95         |
|              | 本章小结 .....                         | 97         |
| <b>第 6 章</b> | <b>MATLAB 在自动控制原理中的应用 .....</b>    | <b>98</b>  |
| 6.1          | 控制系统工具箱函数 .....                    | 98         |
| 6.2          | MATLAB 在自动控制原理数学模型中的应用 .....       | 101        |
| 6.3          | MATLAB 在传递函数中的应用 .....             | 102        |
| 6.3.1        | 在 MATLAB 中表示传递函数 .....             | 103        |
| 6.3.2        | 传递函数的零点和极点 .....                   | 104        |
| 6.4          | MATLAB 在根轨迹分析中的应用 .....            | 106        |
| 6.5          | 控制系统的时间响应分析 .....                  | 110        |
| 6.5.1        | 阶跃响应 .....                         | 110        |
| 6.5.2        | 冲激响应 .....                         | 113        |
| 6.5.3        | 对任意输入的响应 .....                     | 116        |
| 6.6          | 控制系统的频率响应分析 .....                  | 117        |
|              | 本章小结 .....                         | 121        |
| <b>第 7 章</b> | <b>MATLAB 在液压系统设计中的应用 .....</b>    | <b>122</b> |
| 7.1          | 液压伺服控制系统简介 .....                   | 122        |
| 7.2          | MATLAB 在液压系统参数计算中的应用 .....         | 123        |
|              | 本章小结 .....                         | 127        |
| <b>第 8 章</b> | <b>MATLAB 在机电一体化系统设计中的应用 .....</b> | <b>129</b> |
| 8.1          | MATLAB 在 PUMA560 机器人运动仿真中的应用 ..... | 129        |
| 8.2          | 基于 MATLAB 的机电动力系统建模与仿真 .....       | 134        |
|              | 本章小结 .....                         | 140        |
| <b>第 9 章</b> | <b>MATLAB 在电子电路中的应用 .....</b>      | <b>141</b> |
| 9.1          | 基本电气元件简介 .....                     | 141        |
| 9.2          | MATLAB 对电路进行分析和计算 .....            | 142        |
| 9.3          | MATLAB 在二阶电路动态分析中的应用 .....         | 147        |
|              | 本章小结 .....                         | 157        |

|                                    |     |
|------------------------------------|-----|
| <b>第 10 章 Simulink 的应用</b> .....   | 158 |
| 10.1 Simulink 的基本操作与内容 .....       | 158 |
| 10.2 Simulink 的基本操作与内容 .....       | 160 |
| 10.3 Simulink 在信号处理中的应用 .....      | 163 |
| 10.4 Simulink 中对典型环节的仿真 .....      | 168 |
| 10.5 Simulink 在 RLC 电路仿真中的应用 ..... | 171 |
| 10.6 基于 Simulink 的动态系统的建模与仿真 ..... | 177 |
| 10.7 运用 Simulink 实现 PID 设计 .....   | 180 |
| 10.8 运用 Simulink 设计 FIR 滤波器 .....  | 183 |
| 10.9 Simulink 仿真在控制系统中的应用 .....    | 184 |
| 10.10 Simulink 仿真在数学计算中的应用 .....   | 185 |
| 本章小结 .....                         | 190 |
| <b>参考文献</b> .....                  | 191 |

# 第1章 MATLAB 语言概述

## 【本章导读】

本章首先介绍系统与系统模型、仿真技术概论，MATLAB 软件的主要功能；然后介绍 MATLAB 软件的应用领域；最后以 MATLAB R2016a 的安装为例介绍 MATLAB 软件在 Windows、Linux 和 Mac OS X 平台环境下的安装方法。用户可以选择使用 MathWorks 账户激活安装 MATLAB 软件或使用文件安装密钥安装 MATLAB 软件。

## 【本章要点】

- (1) 熟悉 MATLAB 软件的主要功能；
- (2) 了解 MATLAB 软件的应用领域；
- (3) 掌握 MATLAB 软件在相应环境下的安装方法。

## 1.1 系统与系统模型

### 1.1.1 系统的概念

在生活、工作等各个方面，我们都离不开系统，它是人们认识世界、改造世界的过程中对某个事物、某个事件进行分析研究及改造的一个载体。作为计算机仿真技术的载体和研究对象，系统是计算机仿真技术中不可或缺的部分，只有确定好系统的内涵和外延才能够对科学研究及工程设计的各个方面进行归纳、综合、协同、集成等方面的工作。由于各个专业、各个层次的研究目标不同，对系统的定义往往千差万别，一般的系统可以定义为：相互关联又相互作用着的对象的有机组合，该有机组合能够完成某项任务或实现某个预定的目标。

#### 1. 系统三要素

从以上定义可以看出，作为科学研究及工程设计的系统主要由以下三个要素组成。

(1) 对象。系统是由一些相互联系的对象组合而成的，这些对象又称为实体。它可以是一个物理实体，也可以是经济运行的某个模式。例如，一个水温控制系统就是由比较器、调节器、水罐及水、温度传感器等装置组合而成的。

(2) 属性。组成系统的每个对象都有特定的属性。水温控制系统中的温度、偏差值、干扰量、燃料量等就是实体的属性。

(3) 活动。对象之间的相互关联、相互作用以及为完成某个目标而进行系统内部和外部之间的互动，都是系统的活动。在温度控制系统中，以调节电压或燃料的输入量作为主要的活动。

以上这些构成了系统的三个要素，有了这三个要素，系统就可以完成某项任务或实现某个预定的目标，达到研究和设计的目的。

#### 2. 系统的分类

系统的分类千差万别，如果从工程应用的角度出发，可以将系统分为工程系统和非工程

系统。

(1) 工程系统(电气、机电、化工等)。工程系统一般是指可以利用物理、化学等客观规律来进行概括和研究的系统。这也是本章主要介绍的部分。例如,一个复杂的电路可以从节点方程入手对其进行研究分析,也可以从网孔方程出发进行研究分析,两者都可以揭示电路的一些基本定律。

(2) 非工程系统(经济、交通管理等)。非工程系统是指由经济、管理等组成的具有一定统计特性的系统,例如,一个工厂管理系统,它可由生产管理部门、原材料仓库、生产加工车间、销售服务部门等组成,各部门是相互联系和相互作用的。

(3) 综合系统。综合系统往往是工程系统和非工程系统的综合,例如,对于机电系统,当仅仅考虑机电系统本身的特点时,可以将其看成工程系统,而如果在此基础上考虑人员操作率、生产调配等,则这是一个综合系统。

### 1.1.2 系统研究的方法

随着科学研究和社会的发展,人类在认识世界、改造世界的过程中逐渐走向深入,科学技术发展所面临的复杂程度日益加深,类似于阿基米德鉴定金冠的科学方法已经不是科学研究和工程设计的主流方式。人们在进行科学研究和工程设计时已经形成了一些行之有效的方法,通过这些方法可以对所要研究或设计的系统进行分析、综合和设计。

#### 1. 系统研究的三种方法

系统研究归纳起来主要有理论解析法、直接试验法与仿真试验法。

(1) 理论解析法。理论解析法就是运用已掌握的理论知识对系统进行理论上的分析、计算。它是进行理论学习的一种必然应用的方法,其通过理论的学习掌握有关系统的客观规律,通过理论分析推导来对系统进行研究。

(2) 直接试验法。直接试验方法是古人常常采用的方法,譬如伽利略自由落体试验。试验法往往是在系统本身进行试验,试验者利用各种仪器仪表与装置,对系统施加一定类型的激励信号,利用系统的特性输出来进行系统动态特性的研究,例如,通过给电动机突然加电压来测量电动机的阶跃特性,这种方法具有简明、直观与真实、针对性强的特点,在一些小型系统分析与测试中经常被使用。

但是,这种方法采用实际系统进行试验,其费用较高,系统构成复杂,不确定因素太多,并且有些系统由于实现性、安全性等原因不允许进行直接的试验研究,应用的空间、时间受限太多。

(3) 仿真试验法。仿真试验法就是在模型上(物理的或数学的)所进行的系统性能分析与研究的试验方法,它所遵循的基本原则是相似原理。系统模型按照模型的形式可以分为物理模型和数学模型,也可以是两者的结合。

例如,可以用欧姆定律、比例环节和惯性环节等得到相关的控制规律,即系统的数学模型来进行研究;也可以对要设计的系统进行一定比例的缩放,得到缩小或放大的物理模型或者具有一定替代特性的模型来间接地替代。

在物理模型上所进行的仿真试验研究具有效果逼真、精度高等优点,但是存在相对费用较高,且一致性有时难以保证等问题。随着计算机技术和数学理论的飞速发展,人们越来越重视利用数学模型或非实物软件模型来对系统进行研究和设计。这类模型的研究实际上是利

用性能相似的原则来进行的,在一定程度上可以替代实际系统来进行“仿真”是可行的。当然,采用何种手段与方法建立高精度的数学模型并能够在计算机上可靠地计算、运行是这种方法成功与否的关键。

## 2. 用模型进行试验的原因

模型的试验应该说是进行系统研究的主要手段,选择模型进行试验主要有以下几种原因。

(1) 系统尚未设计出来。对于控制系统的设计问题,由于实际系统还没有真正建立起来,所以不可能在实际的系统上进行试验研究。例如,设计一个电气控制系统可以先进行系统的仿真计算来选择相应的传感器、电气设备等。

(2) 某些试验会对系统造成伤害。实际系统上不允许进行试验研究。例如在化工控制系统中,随意改变系统运行的参数,往往会导致最终产品的报废,造成巨额损失,类似的问题还有很多。

(3) 难以保证试验条件的一致性。如果存在人为的因素,则更难保证条件的一致性。对一些设备的操作,每个人的反应能力不同,很难保证设备标准的一致性。可以采用标准的信号或动作来激励系统工作。

(4) 费用高。例如,大型加热炉、飞行器及原子能利用等问题的试验研究。

(5) 无法复原。有些试验是破坏性试验,无法复原,例如电气设备的耐压试验、设备结构的耐压试验、电视机跌落试验等。

# 1.2 仿真技术概论

## 1.2.1 仿真的概念和分类

### 1. 仿真的基本概念

仿真的基本思想是利用物理的或数学的模型来类比模仿现实过程或真实系统,通过对模型的分析 and 试验研究系统的行为寻求过程和规律。

仿真的基础是相似现象,相似性一般表现为两类:几何相似性和数学相似性。当两个系统的数学方程相似,只是符号变换或物理含义不同时,这两个系统称为“数学同构”。事实上,相似性是一个含义比较广的概念,既有几何形状的相似、结构的相似、功能的相似,又有机理和联想的相似,尤其是后者,它是创造力的源泉。

### 2. 仿真方法的分类

仿真方法可以分为三类。

(1) 实物仿真。实物仿真是对实际行为和过程进行仿真,早期的仿真大多属于这一类。实物仿真的优点是直观、形象,时至今日,在航天、建筑、船舶和汽车等许多工业系统的试验研究中心仍然可以见到。比如:用沙盘仿真作战,利用风洞对导弹或飞机的模型进行空气动力学试验,用图样和模型模拟建筑群等都是物理仿真。但是,要为系统构造一套物理模型不是一件简单的事,尤其是十分复杂的系统,将耗费很大的投资,周期也很长。此外,在物理模型上做试验很难改变系统参数,改变系统结构也比较困难。至于复杂的社会、经济系统和生态系统就更无法用实物来做试验了。

(2) 数学仿真。数学仿真就是用数学的语言、方法近似地刻画实际问题,这种刻画的数学表述就是一个数学模型。从某种意义上说,欧几里得几何、牛顿运动定律和微积分都是对客观世界的数学仿真。数学仿真把研究对象(系统)的主要特征或输入、输出关系抽象成一种数学表达式来进行研究。数学模型可分为:解析模型(用公式、方程反映系统过程)、统计模型(蒙特卡罗方法)、表上作业演练模型。

然而,数学仿真也面临一些问题,如果现实问题无法用数学模型来表达,即刻画实际问题的表达式不存在或找不到,就无法进行数学仿真;如果找到的数学模型过于复杂,会导致仿真失败;如果模型做了过多的近似和简化甚至有误,会导致求出的解不正确。

(3) 混合仿真。混合仿真又称为数学-物理仿真,或半实物仿真,就是把物理模型和数学模型以及实物联合在一起进行试验的一种方法,这样往往可以获得比较好的结果。

### 3. 计算机仿真

计算机仿真也称为计算机模拟,就是根据所研究的系统,构造一个能描述真实系统结构和行为以及参与系统控制的主动者——人的思维过程和行为的模型,并用计算机来运行该仿真模型。该模型能模仿实际系统的运行及其随时间变化的过程,可以进行观察、统计和分析,能得到被模拟系统的运行特征,并可以根据模拟结果来测算实际系统的某些参数和性能。利用计算机仿真,使得数学模型的求解变得更加方便、快捷和精确,同时也大大扩展了解决问题的领域和范围。计算机仿真特别适合于解决那些规模大、难以解析化以及不确定的系统。

计算机仿真有一系列优点。

(1) 可以根据所研究系统内部的逻辑关系和数学关系构造面向系统的实际过程和系统行为的仿真模型,进而得到复杂随机系统的解。一般情况下,很难构造准确的数学模型来描述复杂、多随机因素系统。

(2) 能模拟运行无法实施或不允许实施的问题,如模拟某地的地震烈度问题、禁止核试验后的试验问题、太空飞行问题、未来战场的进展问题等。

(3) 可以从众多方案中进行比较和优化。若用人力计算系统中的一些参数以及其变化和影响,工作量将非常巨大,甚至无法完成。

(4) 可模拟有危险和巨大风险的现象和问题,如技术风险、经济风险、投资风险等问题的仿真分析。

(5) 可模拟无法重复的现象。对大型项目的建设,如港口、铁路、机场等可以进行多次、各种因素组合的模拟,以减少损失。

(6) 可以模拟成本过高的问题。如新产品的研制、装配、运动,新结构的破坏性试验等,用计算机模拟方法代替真实的物理试验,将会减少大量人力、物力。

(7) 可以简化建模过程,甚至可避免抽象的数学模型,直接面向问题。有人统计,利用计算机仿真技术,可以节约产品研制费 40% 左右,可以缩短产品研制周期 30%~40%。

#### 1.2.2 仿真的一般过程

计算机仿真过程,概括地说是一个“建模—试验—分析”的过程,即仿真不单纯是对模型的试验,还包括从建模到试验再到分析的全过程,一次完整的计算机仿真有以下几个步骤。

### 1. 系统问题的描述

每一项研究都应从问题的描述（或说明）开始，通常，问题由决策者提供，或由熟悉问题的分析者提供。首先要把被仿真的系统需要解决的问题表达清楚，明确仿真的目的（仿真要回答的问题）、系统方案、系统环境、仿真的条件、仿真试验参数、仿真的初始条件等。还要说明项目计划包括人数、研究费用以及每一阶段工作所需时间等。

### 2. 系统分析

系统分析的目的是把实际问题模型化。根据提出的问题，确定系统涉及的范围，问题的目标函数、可控变量和约束条件，找出系统的实体、属性和活动及其相互关系。

### 3. 建立系统模型

根据系统分析，将实际系统抽象成为数学模型或方块流程图。对连续系统建立数学模型；对离散系统一般用方块流程图来描述，当然也需建立变量之间关系的表达式。系统模型应正确反映实际系统的本质，还应该简繁适度，模型和实际系统没有必要一一对应，只需描述实际系统的本质。因此，最好从简单的模型开始，然后建立更复杂的模型。模型过于简化，无助于对系统的研究；过于复杂，可能会降低模型的效率，甚至使问题难以求解。所以，一般情况下，可以先考虑系统的主要因素并建立较简单的模型，而后再逐步加以补充和完善。

### 4. 数据收集与统计检验

在系统仿真中，除了必要的仿真输入数据以外，还必须收集与仿真初始条件及系统内部变量有关的数据。这些数据往往是某种概率分布随机变量的抽样结果。因此需要对真实系统或类似系统进行必要的统计调查，对数据进行统计检验，确定其概率分布及其相应的参数。

### 5. 构造仿真模型

如前所述，要计算机接受系统模型，还必须将系统模型转变成计算机能接受的仿真模型。仿真模型是指能够在计算机上实现并运行的模型，即逻辑流程图或逻辑框图。

构造仿真模型具有其本身的特点，它是面向问题和过程的建模方式。在离散系统建模中，主要根据随机发生的离散事件、系统中的实体流以及时间推进机制，按系统的运行进程建立模型。

### 6. 仿真程序的编制与验证

建立仿真模型后，就可以按所选用的计算机语言编制相应的仿真程序，即利用数学公式、逻辑公式和算法等来表示实际系统的内部状态和输入/输出的关系。

为了使仿真运行结果能反映仿真模型所具有的性能，必须使仿真程序与仿真模型在内部逻辑关系和数学关系等方面具有高度的一致性。这种一致性通常由仿真程序的语句与仿真模型——逻辑框图的对应性得到保证。但当模型的规模较大或内部逻辑关系比较复杂时，仍需对仿真程序与仿真模型的一致性进行验证，通常采用程序分块调试和程序整体运行的方法来验证仿真程序，也可采用将局部模块的解析计算与仿真结果进行对比的方法来验证仿真程序的正确性。

### 7. 仿真模型的确认

仿真模型在运行之前，必须判断模型是否代表所仿真的实际系统，这就是仿真模型的确认（Validation of Simulation Models）。所谓“确认”，是指确定模型是否能比较精确地代表实际系统。一个复杂系统的仿真模型只能是实际系统的一种近似，因此不能企求仿真模型的绝

对确认。同样,仿真模型的确认只能说明仿真模型符合实际系统的程度。构建模型与仿真模型的确认往往需要反复进行,它不是一次完成的,而是比较模型和实际系统特性的差异,不断对模型进行校正的迭代过程。

实际上,仿真模型确认的过程也是仿真模型建立和修改的过程。因此,仿真模型的确认是一个复杂的过程,并且具有明显的不确定性。目前常用的是三步确认法。

第一步,直观有效性检验。所谓直观有效,是指由熟悉实际系统的人员对模型的建模思想、逻辑结构、输入数据、试运行的输出结果等进行定性和定量的分析,从而初步判断模型是否合理。灵敏度分析常用来检验模型的直观有效性。如输入变量的参数改变时,则输出也应有相应的变化。一个排队系统,如改变顾客的到达率,则可以预料服务台的利用率、平均队长、顾客在系统中的逗留时间等参数的变化趋向,这就是灵敏度试验。对于一个大型仿真模型,可能有许多输入变量,此时应选择重要的、灵敏度高的输入变量来做灵敏度试验。

第二步,检验模型的假设。这一步的目的是定量地检验建模时所做的各项假设。模型假设分两类:结构假设和数据假设。结构假设包括对实际系统的抽象与简化。如在土方挖运系统中,假设是多站单队,先到先服务,则需通过实际观察验证假设是否正确。数据假设包括对所有输入变量概率分布的假设。如在排队系统对到达过程和服务过程的概率分布假设等。可用理论分布去拟合观察数据,通过统计检验判断输入变量概率分布假设的正确性。

第三步,确定仿真输出结果的代表性。观察初步仿真运行的输出数据与估计的结果或类似系统的数据特性是否近似。

通过以上三步,一般可认为该仿真模型已得到了确认。如发现模型的灵敏度不高,或模型的假设不合理,或输出结果无代表性,则该仿真模型不能得到确认,必须进行相应的修改,并重新进行三步法确认,直至三步都满意为止。

## 8. 仿真试验设计

仿真试验设计即确定仿真的方案、初始化周期的长度、仿真运行的长度以及每次运行的重复次数等参数。

## 9. 仿真模型的运行

当仿真程序已经过验证,仿真模型已得到确认,仿真试验方案确定之后,就可以对仿真模型进行正式运行。每次仿真运行是对系统的一次抽样,经多次独立的仿真运行,就可以得到仿真结果的分布规律。这种独立的重复仿真运行,应当在相同的初始条件和相同的输入数据的条件下采用相互独立的随机数流进行仿真。在这种情况下才能采用古典的统计方法,对仿真结果做出正确的估计。

## 10. 仿真结果分析

对仿真模型进行多次独立运行后,可以得到一系列输出结果。对这些结果,通常需要利用理论定性分析、经验定性分析或系统历史数据定量分析来检验模型的正确性,利用灵敏度分析等手段来检验模型的稳定性,从而估计被仿真系统设计的性能量度。一般情况下,需要在以下两个方面进行分析:一是对一个实际系统的仿真分析,以便得到某个事件发生的概率和随机变量的期望值。由于仿真求解的结果只能得到概率的近似值频率和期望值的近似值平均值,因此,要采用统计推断的方法做出以频率代替概率和以平均值代替期望值的误差估计。二是灵敏度分析,即观察输入参数值的变化对输出结果的影响。如果某个参数的微小变化会引起输出结果的巨大波动,则说明这些参数的灵敏度高,对这些参数应予以足够的重

视, 对其仿真结果要做出更精确的误差估计。

### 11. 仿真的总结

整理数据、资料、文件及报表结果等, 以便对未来事件进行预测、对生产实践加以指导等。

## 1.3 MATLAB 软件的功能

MATLAB 是美国 MathWorks 公司出品的商业数学软件, 用于算法开发、数据可视化、数据分析以及数值计算的高级技术计算语言和交互式环境, 主要包括 MATLAB 和 Simulink 两大部分。

MATLAB 将数值分析、矩阵计算、科学数据可视化以及非线性动态系统的建模和仿真等诸多强大功能集成在一个易于使用的视窗环境中, 为科学研究、工程设计以及必须进行有效数值计算的众多科学领域提供了一种全面的解决方案, 并在很大程度上摆脱了传统非交互式程序设计语言 (如 C、Fortran) 的编辑模式, 代表了当今国际科学计算软件的先进水平。

MATLAB 的主要功能和特性如下。

### 1. 强大的科学计算机数据处理能力

MATLAB 是一个包含大量计算算法的集合, 其拥有 600 多个工程中要用到的数学运算函数, 可以方便地实现用户所需的各种计算功能。MATLAB 的这些函数集包括从最简单最基本的函数到诸如矩阵、特征向量、快速傅里叶变换的复杂函数。函数所能解决的问题大致包括矩阵运算和线性方程组的求解、微分方程及偏微分方程组的求解、符号运算、傅里叶变换和数据的统计分析、工程中的优化问题、稀疏矩阵运算、复数的各种运算、三角函数和其他初等数学运算、多维数组操作以及建模动态仿真等。

### 2. 出色的图形处理功能

MATLAB 自产生之日起就具有方便的数据可视化功能, 可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; 可用于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。

### 3. 应用广泛的模块集合工具箱

MATLAB 对许多专门的领域都开发了功能强大的模块集和工具箱。它们都是由特定领域的专家开发的, 用户可以直接使用工具箱学习、应用和评估不同的方法而不需要自己编写代码。目前, MATLAB 已经把工具箱延伸到了科学研究和工程应用的诸多领域, 诸如数据采集、数据库接口、概率统计、样条拟合、优化算法、偏微分方程求解、神经网络、小波分析、信号处理、图像处理、系统辨识、控制系统设计、LMI 控制、鲁棒控制、模型预测、模糊逻辑、金融分析、地图工具、非线性控制设计、实时快速原型及半物理仿真、嵌入式系统开发、定点仿真、DSP 与通信、电力系统仿真等, 都在工具箱家族中有了自己的一席之地。

### 4. 实用的程序接口和发布平台

新版本的 MATLAB 可以利用 MATLAB 编译器和 C/C++ 数学库以及图形库, 将自己的 MATLAB 程序自动转换为独立于 MATLAB 运行的 C 和 C++ 的代码。允许用户编写可以和 MATLAB 进行交互的 C 或 C++ 语言程序。MATLAB 的一个重要特色就是具有一套程序扩展系统和一组称之为工具箱的特殊应用子程序。

## 5. 应用软件开发

在开发环境中,用户可以更方便地控制多个文件和图形窗口;在编程方面支持函数嵌套,有条件中断等;在图形化方面,有更强大的图形标注和处理功能,包括特性对接连接注释等;在输入输出方面,可以直接向 Excel 和 HDF5 进行连接。

## 1.4 MATLAB 软件的应用

MATLAB 的应用范围非常广,包括信号和图像处理、通信、控制系统设计、测试和测量、财务建模和分析以及计算生物学等众多应用领域。附加的工具箱可扩展 MATLAB 环境,以解决这些应用领域内特定类型的问题。

可以用 MATLAB 软件来进行以下各种工作。

- (1) 数值分析。
- (2) 数值和符号计算。
- (3) 工程与科学绘图。
- (4) 控制系统的设计与仿真。
- (5) 数字图像处理技术。
- (6) 数字信号处理技术。
- (7) 通信系统设计与仿真。
- (8) 财务与金融工程。
- (9) 管理与调度优化计算(运筹学)。

## 1.5 MATLAB 软件的安装

我们可以访问 MathWorks 公司的官方网站(<https://cn.mathworks.com>)来获取本书使用的软件版本 MATLAB R2016a,也可下载安装 MATLAB 软件的最新版本。现以 MATLAB R2016a 的安装为例介绍 MATLAB 软件的安装方法。

### 1. 使用 MathWorks 账户激活安装

步骤 1: 启动激活应用程序。

要启动激活应用程序,请使用以下方法之一:

- (1) 在安装结束时,保持选中“安装完毕”对话框中的【激活 MATLAB】复选框。
- (2) 启动已安装但尚未激活的 MATLAB®安装。
- (3) 如果已在运行 MATLAB,请在主页选项卡上的资源部分中,选择帮助→许可→激活软件。
- (4) 导航到 MATLAB 安装文件夹并打开激活应用程序。

Windows 系统: 双击 MATLABroot\bin\\${ARCH} 文件夹中的 activate\_MATLAB.exe 文件,其中 MATLABroot 为 MATLAB 安装文件夹,\${ARCH} 为特定于平台的子文件夹,例如: MATLABroot\bin\win64。

Linux 系统: 执行 MATLABroot/bin 文件夹中的 activate\_MATLAB.sh 脚本。

Mac OS X 系统: 双击 MATLAB 应用程序包中的激活应用程序图标。要查看 MATLAB 应

用程序包的内容，右击（或按住 Ctrl 并单击）该包，然后选择显示包内容。

步骤 2：选择是自动激活还是手动激活。

激活是验证是否已获许可使用 MathWorks®产品的过程。此过程会验证许可证，并确保使用该许可证的计算机或用户数量未超过所获得许可证选项允许使用的数量。

如果允许安装程序启动激活应用程序，并且已在安装期间登录到 MathWorks 账户，则登录会话将持续到激活过程。单击 Next 按钮继续激活（图 1-1）。

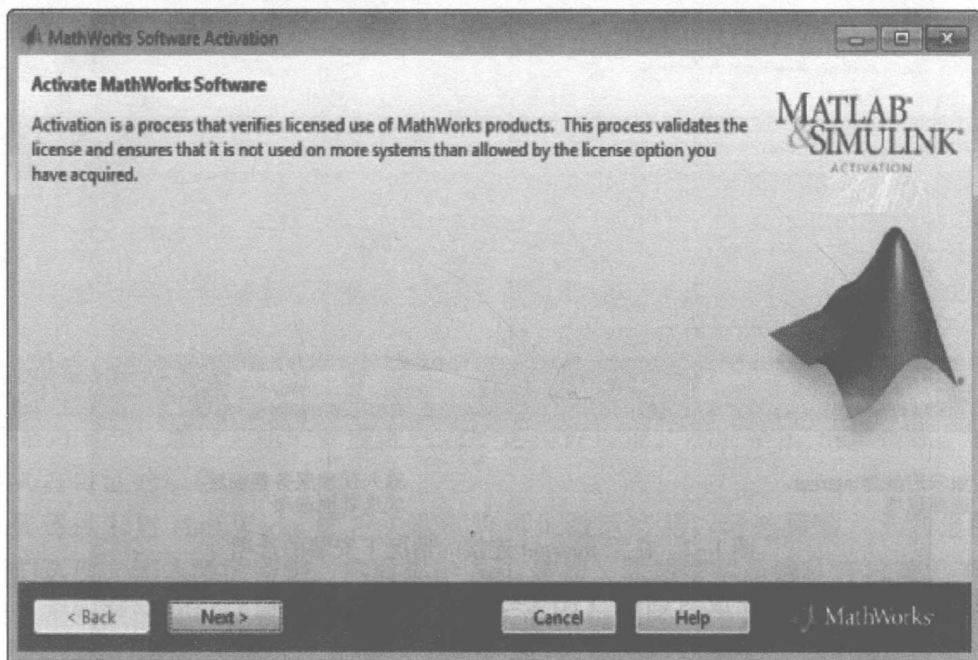


图 1-1 激活过程中单击 Next 按钮

如果在安装期间未登录到 MathWorks 账户，或者已单独启动激活应用程序，则必须选择是自动激活还是手动激活。如果已连接到 Internet，请保持选中使用 Internet 自动激活（推荐）选项。安装之后立即激活是开始使用 MATLAB 的最快方式。

如果未连接到 Internet，请选择在不使用 Internet 的情况下手动激活（图 1-2）。如果选择此选项，则需要许可证文件才能手动激活。许可证文件用于确认可运行的产品。如果尚未获得该文件，请与许可证管理员联系。

步骤 3：登录到 MathWorks 账户。

输入 MathWorks 账户的电子邮件地址和密码，然后单击 Next 按钮。激活应用程序将与 MathWorks 联系，获取与账户相关联的许可证。如果对账户启用了双重验证，系统会按首选方式发送一个验证码。

如果没有 MathWorks 账户，请选择我需要创建账户（需要激活密钥）选项，并单击 Next 按钮。

如果已有许可证文件，请选中输入许可证文件的完整路径（包括文件名）选项，指定该文件的完整路径，然后单击 Next 按钮。许可证文件用于确认可运行的产品。请与许可证管理员联系以获取此许可证文件。在指定许可证文件后，激活应用程序将跳过此过程中的所有