



高等学校电子信息类专业规划教材

基于MATLAB的 控制系统计算机仿真

瞿亮主编

凌民傅昱蔡立军副主编



清华大学出版社
<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>



北京交通大学出版社
<http://press.bjtu.edu.cn>



21 世纪高等学校电子信息类专业规划教材

基于 MATLAB 的 控制系统计算机仿真

瞿 亮 主 编
凌 民 傅 昱 蔡立军 副主编

清华大学出版社
北京交通大学出版社
· 北京 ·

内 容 简 介

本书基于 MATLAB 6.1 版本,详细介绍了 MATLAB 的基础知识及其在自动控制计算机仿真中的应用。主要内容包括 MATLAB 的基本语法,仿真工具 SIMULINK 的使用,控制系统的数学描述,基于 MATLAB 的控制系统时域分析、频域分析、根轨迹分析和控制系统的设计及控制常用工具箱的功能等。

全书内容详实,结构清晰,力求做到理论与实践紧密结合。本书可作为高校该类专业的研究生与高年级本科生控制系统计算机辅助设计课程的教材和参考书。也可作为自动控制类专业的工程技术人员及计算机开发人员参考书。

版权所有,翻印必究。举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

本书防伪标签采用特殊防伪技术,用户可通过在图案表面涂抹清水,图案消失,水干后图案复现;或将表面膜揭下,放在白纸上用彩笔涂抹,图案在白纸上再现的方法识别真伪。

图书在版编目(CIP)数据

基于 MATLAB 的控制系统计算机仿真/瞿亮主编. —北京:清华大学出版社;北京交通大学出版社,2006.1

(21 世纪高等学校电子信息类专业规划教材)

ISBN 7-81082-660-3

I. 基… II. 瞿… III. 自动控制系统-计算机仿真-软件包, MATLAB-高等学校-教材 IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 136713 号

责任编辑:周益丹 特邀编辑:吴炳林

出版者:清华大学出版社 邮编:100084 电话:010-62776969

北京交通大学出版社 邮编:100044 电话:010-51686414

印刷者:北京鑫海金澳胶印有限公司

发行者:新华书店总店北京发行所

开本:185×260 印张:17.25 字数:412 千字

版次:2006 年 1 月第 1 版 2006 年 1 月第 1 次印刷

书号:ISBN 7-81082-660-3/TP·250

印数:1~4 000 册 定价:25.00 元

本书如有质量问题,请向北京交通大学出版社质监局反映。对您的意见和批评,我们表示欢迎和感谢。

投诉电话:010-51686043,51686008;传真:010-62225406;E-mail: press@center.bjtu.edu.cn。

前 言

随着计算机技术的发展,计算机仿真得到非常广泛的应用,已成为科学研究的一种重要的手段。控制系统的数字仿真课程是控制理论、计算数学和计算机等知识的交叉学科,它是分析和设计各种复杂系统的强有力的工具。

MATLAB 作为当前国际控制界最流行的面向工程与科学计算的高级语言,它可轻易地实现 C 或 FORTRAN 语言几乎全部的功能,并设计出功能强大、界面优美、稳定可靠的高质量程序,编程效率和计算效率极高。MATLAB 环境下的 SIMULINK 是当前众多仿真软件中功能最强大、最优秀、最容易使用的一个用于系统建模、仿真和分析的动态仿真集成环境工具,在各个领域都得到广泛的应用。

本书基于 MATLAB 6.1 版本,详细介绍了计算机仿真的基本原理, MATLAB 的基础知识及其在控制系统计算机仿真中的应用。主要内容包括仿真的基础知识及常用算法, MATLAB 的基本语法,仿真工具 SIMULINK 的使用,控制系统的数学描述,基于 MATLAB 的控制系统时域分析、频域分析、根轨迹分析和设计及控制系统常用工具箱和工具等。

本书内容编著者根据数字仿真技术近年来在自动控制技术中的发展情况和当前最新版的 MATLAB 的使用情况,以及多年来在教学和科研上的经验,结合实例由浅入深进行介绍。全书共分为 9 章,第 1 章介绍仿真的基础知识,第 2~4 章介绍 MATLAB 的环境、语法、数学运算和绘图功能。第 5、6 章介绍控制系统仿真的基础知识、分析和设计方法。第 7 章介绍仿真工具 SIMULINK。第 8 章简要介绍控制系统常用工具箱的功能。考虑到系统仿真是一门实验性很强的学科,本书的第 9 章附有实验指导安排。

本书的参考教学学时为 32 学时。学习本课程之前,学生必须已修过“自动控制原理”、“计算机程序设计语言”等课程。仿真实验课程约 15 学时(机时)。

本书可作为高校该类专业的研究生与高年级本科生控制系统计算机仿真课程的教材和参考书,也可作为自动控制类专业的工程技术人员及计算机开发人员的参考书。

由于 MATLAB 是一个极其庞大,而且功能完善的软件,我们不可能将其所有的功能一一介绍给读者,但本书涉及的内容基本覆盖了控制系统中常用的分析工具和分析方法,并向读者详细阐述了 MATLAB 中实现这些方法的步骤。

本书由瞿亮主编,凌民、傅昱、蔡立军任副主编。由于作者水平有限,难免有错漏之处,请读者不吝赐教。欢迎读者通过 E-mail: quliang2001@yahoo.com.cn 或 ljcaihn@sina.com 与作者联系。

编 者
2006 年 1 月

目 录

第 1 章 系统仿真及 MATLAB 概述	(1)
1.1 系统、模型与仿真	(1)
1.1.1 系统与模型	(1)
1.1.2 仿真的概念和应用	(2)
1.1.3 仿真的基本步骤	(5)
1.1.4 仿真技术的发展	(6)
1.1.5 控制系统分类及仿真技术的应用	(7)
1.2 MATLAB 简介	(8)
1.2.1 MATLAB 的发展历程	(8)
1.2.2 MATLAB 语言的特色	(9)
1.2.3 MATLAB 的工具箱	(10)
1.2.4 MATLAB 的技术支持	(11)
1.2.5 本书学习方法	(12)
习题 1	(13)
第 2 章 MATLAB 运行环境及程序设计	(14)
2.1 MATLAB 的安装环境	(14)
2.1.1 MATLAB 的安装、启动及退出	(14)
2.1.2 MATLAB 的基本组成	(15)
2.1.3 MATLAB 的目录结构	(16)
2.2 MATLAB 的操作界面	(16)
2.2.1 主窗口	(16)
2.2.2 命令窗口	(17)
2.2.3 历史命令窗口	(18)
2.2.4 工作空间浏览器	(18)
2.2.5 程序编辑/调试器	(19)
2.2.6 内存数组编辑器	(19)
2.2.7 路径浏览器	(20)
2.2.8 启动平台窗口	(21)
2.2.9 帮助系统	(21)
2.3 变量、表达式及运算符	(22)
2.3.1 变量的命名和赋值	(22)
2.3.2 系统默认变量	(25)

2.3.3 运算符	(25)
2.4 MATLAB 的程序设计和调试	(30)
2.4.1 M 文件	(30)
2.4.2 流程控制	(32)
2.4.3 程序的调试	(36)
2.4.4 程序的优化	(37)
2.5 MATLAB 文件操作	(39)
2.5.1 文件的打开与关闭	(39)
2.5.2 文件的读写操作	(40)
2.6 常用命令函数	(42)
2.7 文字处理工具 NOTEBOOK	(44)
2.7.1 Notebook 操作基础	(44)
2.7.2 细胞的使用	(44)
2.7.3 输出格式	(46)
习题 2	(46)
第 3 章 MATLAB 的数学运算	(48)
3.1 矩阵的创建和矩阵元素操作	(48)
3.1.1 创建矩阵	(48)
3.1.2 提取矩阵元素	(52)
3.2 数组运算	(52)
3.2.1 代数运算	(52)
3.2.2 常用运算函数	(53)
3.2.3 字符串	(55)
3.3 矩阵运算	(55)
3.3.1 代数运算	(55)
3.3.2 矩阵分析	(57)
3.3.3 方程组求解	(62)
3.3.4 稀疏矩阵	(64)
3.4 多项式运算	(65)
3.4.1 多项式的基本运算	(65)
3.4.2 多项式的求根及求值	(66)
3.4.3 多项式求导数	(67)
3.5 插值与曲线拟合	(67)
3.5.1 一维数据插值	(67)
3.5.2 二维数据插值	(68)
3.5.3 三维及多维插值	(68)
3.5.4 曲线拟合	(68)

3.6 数据分析及统计	(69)
3.6.1 最大值和最小值	(69)
3.6.2 求和与求积	(70)
3.6.3 平均值和中值	(71)
3.6.4 累加和与累乘积	(71)
3.6.5 标准方差与相关系数	(71)
3.6.6 排序	(72)
3.7 数值微积分	(73)
3.7.1 数值积分	(73)
3.7.2 数值微分	(75)
3.7.3 微分方程初值问题的数值解法	(76)
3.7.4 函数的零点和极值	(76)
3.8 符号运算	(77)
3.8.1 符号变量及表达式定义	(78)
3.8.2 符号表达式运算	(79)
3.8.3 符号方程求解	(81)
3.8.4 符号微积分	(82)
3.8.5 级数	(84)
3.8.6 调用 Maple 函数	(85)
习题3	(86)
第4章 MATLAB 的绘图及图像处理	(87)
4.1 二维绘图	(87)
4.1.1 基本绘图	(87)
4.1.2 特殊坐标图形	(93)
4.1.3 统计分析图形	(95)
4.2 三维绘图	(98)
4.2.1 三维曲线及曲面	(98)
4.2.2 图形修饰	(101)
4.2.3 特殊三维图形	(104)
4.3 动画制作	(107)
4.3.1 电影动画	(107)
4.3.2 程序动画	(108)
4.4 图形对象及其属性	(109)
4.4.1 图形对象及其句柄	(109)
4.4.2 图形对象属性	(110)
4.4.3 图形对象的创建	(111)
4.5 图像处理	(112)

4.5.1	图像处理工具箱简介	(113)
4.5.2	图像处理的基本方法和函数	(113)
4.5.3	应用实例	(120)
习题4		(127)
第5章	控制系统的仿真基础	(128)
5.1	控制系统概述	(128)
5.1.1	建立数学模型的方法	(128)
5.1.2	控制系统的组成符号及术语	(129)
5.1.3	微分方程与传递函数	(129)
5.1.4	控制系统典型环节及常见的典型结构	(131)
5.1.5	控制系统仿真的性能要求	(132)
5.1.6	控制系统工具箱简介	(132)
5.2	常用仿真算法	(133)
5.2.1	连续系统仿真算法	(133)
5.2.2	离散事件系统仿真算法	(136)
5.2.3	仿真精度与系统的稳定性	(136)
5.3	控制系统数学模型的 MATLAB 描述	(138)
5.3.1	传递函数模型(tf 模型)	(138)
5.3.2	状态方程模型(ss 模型)	(139)
5.3.3	零极点模型(zpk 模型)	(140)
5.2.4	结构图模型	(140)
5.3.5	控制系统工具箱中的 LTI 对象	(141)
5.3.6	延迟系统的模型	(143)
5.3.7	非线性系统的线性化模型	(143)
5.3.8	连续域与离散域的相互转化	(145)
5.4	系统模型的转换及连接	(146)
5.4.1	系统模型的转换	(146)
5.4.2	系统模型的连接	(148)
5.5	模型的属性描述、降阶与标准化	(149)
5.5.1	控制系统的模型属性	(149)
5.5.2	模型的降阶	(151)
5.5.3	模型的实现	(151)
习题5		(151)
第6章	控制系统的分析与设计	(152)
6.1	稳定性分析	(152)
6.1.1	稳定性分析的原理	(152)
6.1.2	MATLAB 判别稳定性的方法	(153)

6.1.3 实例分析	(153)
6.2 时域分析	(155)
6.2.1 时域分析的基本原理	(155)
6.2.2 MATLAB 进行时域分析的方法	(156)
6.2.3 实例分析	(158)
6.3 频域分析	(164)
6.3.1 频域分析的基本原理	(164)
6.3.2 MATLAB 进行频域分析的方法	(165)
6.3.3 实例分析	(167)
6.4 根轨迹分析	(169)
6.4.1 根轨迹分析的基本原理	(169)
6.4.2 MATLAB 进行根轨迹分析的方法	(170)
6.4.3 实例分析	(171)
6.5 控制系统设计	(173)
6.5.1 控制系统设计的基本方法	(173)
6.5.2 MATLAB 进行系统设计的方法	(174)
6.5.3 实例分析	(174)
6.6 控制工具箱中的实用工具	(183)
6.6.1 系统分析工具 LTIVIEW	(183)
6.6.2 SISO 系统设计工具 SISO Design Tool	(186)
习题6	(188)
第7章 仿真工具 SIMULINK	(190)
7.1 SIMULINK 概述	(190)
7.1.1 SIMULINK 简介	(190)
7.1.2 SIMULINK 的启动和退出	(191)
7.2 SIMULINK 的模块库	(191)
7.2.1 SIMULINK 公共模块库	(192)
7.2.2 SIMULINK 专业模块库	(196)
7.3 模型的建立	(196)
7.3.1 模块的查找与选择	(197)
7.3.2 模块的复制、剪切、移动与删除	(197)
7.3.4 模块外形的调整	(197)
7.3.5 模块名的处理	(198)
7.3.6 模块参数的设置	(198)
7.3.7 模块的连接	(198)
7.3.8 建模时的注意事项	(199)
7.4 仿真参数设置	(200)

7.4.1	参数标签页的设置	(200)
7.4.2	提高仿真性能和精度	(205)
7.5	仿真结果的运行、观察和调试	(206)
7.5.1	使用菜单运行仿真	(206)
7.5.2	使用命令进行仿真	(206)
7.5.3	观察并分析仿真结果	(208)
7.5.4	仿真的调试技术	(210)
7.6	模块的合成和封装	(212)
7.6.1	模块的合成	(212)
7.6.2	模块的封装	(213)
7.7	S-函数	(216)
7.7.1	S-函数的概念	(216)
7.7.2	用 MATLAB 语言编写 S-函数	(217)
7.7.3	用 C 语言编写 S-函数	(217)
7.7.4	MATLAB 与 C 和 FORTRAN 的动态链接	(218)
习题 7		(218)
第 8 章	MATLAB 控制系统解决方案及常用工具箱	(220)
8.1	MATLAB 控制系统解决方案	(220)
8.1.1	基于模型设计的开发集成环境	(220)
8.1.2	MATLAB 工具箱编写技巧	(223)
8.2	控制系统常用工具箱	(224)
8.2.1	信号处理工具箱	(224)
8.2.2	鲁棒控制工具箱	(225)
8.2.3	系统辨识工具箱	(226)
8.2.4	最优化工具箱	(227)
8.2.5	样条工具箱	(228)
8.2.6	神经网络工具箱	(228)
8.2.7	模糊逻辑工具箱	(229)
8.2.8	小波工具箱	(231)
习题 8		(232)
第 9 章	仿真实验	(233)
9.1	MATLAB 环境语法及数学运算	(233)
9.1.1	实验目的	(233)
9.1.2	实验内容	(233)
9.2	MATLAB 数学运算及绘图	(234)
9.2.1	实验目的	(234)
9.2.2	实验内容	(234)

9.3 SIMULINK 仿真 (235)

9.3.1 实验目的 (235)

9.3.2 实验内容 (235)

9.4 控制系统建模及稳定性分析 (236)

9.4.1 实验目的 (236)

9.4.2 实验内容 (236)

9.5 控制系统的分析与设计 (237)

9.5.1 实验目的 (237)

9.5.2 实验内容 (237)

附录 A MATLAB 索引 (238)

A.1 MATLAB 的标点及符号 (238)

A.2 函数及指令 (239)

附录 B 控制系统工具箱函数一览表 (256)

参考文献 (261)

第 1 章 系统仿真及 MATLAB 概述

仿真是 20 世纪 40 年代末伴随着计算机技术的发展而逐步形成的一类试验研究的新兴方法。最初,仿真主要应用于航空、航天、原子反应堆等少数领域。此后,由于计算机技术和信息科学的迅猛发展,为仿真技术的应用提供了技术和物质基础,目前仿真已渗透到国民经济各个领域,成为分析、研究各种系统,尤其是复杂系统的重要工具,它不仅用于工程领域,如机械、航空、航天、电力、冶金、化工、电子等方面,还广泛用于非工程领域,如交通管理、生产调度、库存控制、生态环境以及社会经济等方面。本章将介绍系统仿真的有关概念和原理,并简要介绍 MATLAB 语言的基本特点。

1.1 系统、模型与仿真

1.1.1 系统与模型

为了能全面、正确地理解系统仿真,需要对系统仿真所研究的对象有个概要的了解。这里对与系统仿真相关的知识——系统与系统模型进行简单的介绍。

1. 系统

系统是一个内涵十分丰富的概念,很难给它下一个准确的定义,从广义上来讲,系统是指具有某些特定功能,相互联系、相互作用的元素的集合。这里的系统泛指自然界的一切现象与过程。它具有两个基本特征:整体性和相关性。整体性是指系统作为一个整体存在而表现出某项特定的功能,它是不可分割的。相关性是指系统的各个部分、元素之间是相互联系的,存在物质、能量与信息的交换。对于任何系统的研究都必须从如下方面考虑。

(1) 实体:组成系统的元素、对象。

(2) 属性:实体的特征。

(3) 活动:系统由一个状态到另一个状态的变化过程。

(4) 状态:某时刻系统中实体、属性、活动的信息总和称为系统在该时刻的状态,用状态变量描述。

研究系统主要是研究系统的动态变化。除了研究系统的实体属性活动外,还需要研究影响系统活动的外部条件,这些外部条件称之为环境。自然界的实物之间是普遍联系的,系统是在外界环境的不断变化中产生活动的,因此研究系统所处的环境是十分必要的。但是应该注意到,系统与环境的边界是不确定的,对于同个系统可能因为研究目的的不同而不同。

值得说明的是,应广义理解系统,其概念是很广的,大至无限的宇宙世界,小到分子、原子,都可称之为系统。可以说,仿真中所研究的一切对象都可称为系统。系统仿真是研究系统的一种重要手段,而系统模型则是仿真所要研究的直接对象。

2. 系统的分类

(1) 按系统的物理特征(构造方式)分,可分为工程系统与非工程系统。

- 工程系统(人造系统): 为某种目的而人为构成的系统,如控制系统、通信系统等。
- 非工程系统(自然系统): 自然和社会在发展过程中形成的、被人们在长期的社会活动中逐步认识的系统,如股市系统、交通系统、生物系统等。

(2) 按系统状态随时间的变化分,可分为连续系统与离散事件系统。

- 连续系统: 状态随时间连续变化,如弹体飞行速度,可用微分方程等表示。
- 离散事件系统: 状态的变化在离散的时间点上发生,如炮弹发射、命中。

3. 系统模型

系统模型是对实际系统的一种抽象,是对系统本质(或是系统的某种特性)的一种描述。模型可视为对真实世界中物体或过程的信息进行形式化的结果。模型具有与系统相似的特性,可以以各种形式给出我们感兴趣的信息。好的模型能够更深刻地反映实际系统的主要特征和运动规律,它是对实际系统更高层次的抽象,本身就是对实体认识的结果。从这个意义上来说,模型优于实体。

模型可以分为物理模型和数学模型。物理模型又称为实体模型,是根据系统之间的相似性而建立起来的物理模型。物理模型最常见的是比例模,如风洞吹风实验常用的翼型模型或建筑模型。

用抽象的数学方程描述系统内部物理变量之间的关系而建立起来的模型,称为该系统的数学模型。通过对系统的数学模型的研究可以揭示系统的内在运动和系统的动态性能。数学模型又可以分为静态模型和动态模型两类。

(1) 静态模型。静态模型的一般形式是代数方程、逻辑表达式,如理想电位器的转角和输出电压之间的关系式或继电器的逻辑关系式等。

(2) 动态模型。动态模型又可分为连续系统动态模型和离散系统动态模型。

① 连续系统动态模型: 连续系统模型有确定型模型和随机型模型之分。若一个系统的输出完全可以用它的输入来表示,则称之为确定性系统。若系统的输出是随机的,即对于给定的输入存在多种可能的输出,则该系统是随机系统。确定型模型又分为集中参数模型和分布参数模型两种。集中参数模型描述系统运动用的是常微分方程、状态方程和传递函数。而描述热传递过程的偏微分方程则是典型的分布参数模型。

② 离散系统动态模型: 又可进一步分为时间离散系统模型和离散事件模型。

- 时间离散系统模型: 时间离散系统又称为采样控制系统,一般用差分方程、离散状态方程和脉冲传递函数来描述。这种系统的特性其实是连续的,仅仅在采样的时刻点上来研究系统的输出。各种数字式控制器的模型均居于这一类。

- 离散事件模型: 离散事件系统的输出不完全由输入作用的形式描述。往往存在着多种可能的输出。它是一个随机系统,如库存系统、管理车辆流通的交通系统、排队服务系统等。输入和输出在系统中是随机发生的,一般要用概率模型来描述这种系统。

1.1.2 仿真的概念和应用

1. 仿真的概念

“仿真”一词译自英文 Simulation,另一个曾经用过的译名是“模拟”。从字面上解释,

“仿真”和“模拟”都是表示“模仿真实世界”的意思。虽然人们很早就采用了利用模型来分析与研究真实世界的方法,亦即“仿真”或“模拟”的方法,但严格地讲,只有在 20 世纪 40 年代末计算机(模拟计算机及数字计算机)的问世,才为建立模型及对模型进行试验提供了强有力的支持,仿真技术也才获得了迅速的发展并逐步成为一门独立的学科。

仿真以相似性原理、控制论、信息技术及相关领域的有关知识为基础,以计算机和各种专用物理设备为工具,借助系统模型对真实系统进行试验研究的一门综合性技术。它利用物理或数学方法来建立模型,类比模拟现实过程或者建立假想系统,以寻求过程的规律,研究系统的动态特性,从而达到认识和改造实际系统的目的。

相似性原理是仿真主要的理论依据。所谓相似,是指各类事物或对象间存在的某些共性。相似性是客观世界的一种普遍现象,它反映了客观世界不同事物之间存在着某些共同的规律。例如:电路中的 RLC 振荡和机械中的弹簧振动都可以用相同的微分方程描述。

系统仿真涉及相似论、控制论、计算机科学、系统工程理论、数值计算、概率论、数理统计、时间序列分析等多种学科。

数字仿真亦即计算机仿真,仿真技术是伴随着计算机技术的发展而发展的。在计算机问世之前,基于物理模型的实验一般称为“模拟”,它一般附属于其他相关学科。自从计算机特别是数字计算机出现以后,其高速计算能力和巨大的存储能力使得复杂的数值计算成为可能,数字仿真技术得到蓬勃的发展,从而使仿真形成一门专门学科——系统仿真学科。

2. 仿真分类

按照实现方式的不同可以将系统仿真分为如下几类。

(1) 物理仿真:它是指研制某些实体模型,使之能够重现原系统的各种状态。在计算机问世以前,基本上是物理仿真。物理仿真的优点是能最大限度地反映系统的物理本质,具有直观性强和形象化的特点;缺点是构造物理模型所需费用高、周期长、技术复杂,其次是在物理模型上做试验,修改模型的结构及参数困难,实验限制条件多。容易受到环境条件的干扰。例如:为了研究飞机翼型,要建立翼型的比例模型,更重要的是要在地面建立对空气中气流环境的模拟,投资巨大,周期长,且灵活性差,但是为了研制、验证种新的翼型这又往往是必不可少的。

(2) 数学仿真:数学仿真就是用数学语言去表述一个系统,并编制程序在计算机上对实际系统进行研究的过程。这种数学表述就是数学模型。数学仿真把研究对象的结构特征或者输入输出关系抽象为一种数学描述(微分方程、状态方程),可分为解析模型、统计模型来研究,具有很大的灵活性,它可以方便地改变系统结构、参数;而且速度快,可以在很短的时间内完成实际系统很长时间的动态演变过程;精确度高,可以根据需要改变仿真的精度;重复性好,可以很容易地再现仿真过程。然而数学仿真也有其局限性。对某些复杂系统可能很难用数学模型来表达,或者难以建立其精确模型,或者数学模型过于复杂而目前无法求解,或者计算量太大而无法利用现有的计算资源进行仿真。

(3) 数学物理仿真或者混合仿真:为了提高仿真的可信度或者针对难以建模的实体,在系统研究中往往把数学模型、物理模型和实体结合起来组成复杂的仿真系统,这种在仿真环节中存在实体的仿真称为数学物理仿真或者混合仿真。这样的仿真系统有飞机半实物仿真、射频制导弹半实物仿真等,有许多模拟器也属于半实物仿真。

实际上在工程实践中,以上各种仿真往往用于工程中的不同阶段。在工程设计分析阶段采用数学仿真,易于更改设计,具有灵活性和经济性。在部件子系统研制阶段,采用半实物仿真以提高仿真可信度和测试部件或子系统的功能。在最后定型阶段为了验证全系统的功能特性,则需要进行全物理仿真。

按照仿真系统与实际系统时间尺度上的关系,又可将其分为如下几类。

(1) 实时仿真: 仿真时钟与系统实际时钟完全一致。许多仿真应用需要满足实时性,这时往往需要实时操作系统或者专用实时仿真硬件的支持。

(2) 欠实时仿真: 仿真时钟比实际时钟慢。当对仿真的实时性没有严格的要求时,仿真时钟比实际时钟慢,不影响仿真的目的,采取欠实时仿真则可节约很多资金。

(3) 超实时仿真。仿真时钟比实际时钟快。当实际系统周期太长时,若采用实际时钟就变得毫无意义,这时就要进行超实时仿真。对于大的、复杂的系统进行超实时仿真对计算机的计算速度要求是非常高的,如天气预报系统就需要超级计算机的支持。

3. 仿真技术的应用

随着仿真技术的发展,仿真技术应用目的趋于多样化、全面化。最初仿真技术是作为对实际系统进行试验的辅助工具而应用的,而后又用于训练目的,现在仿真系统的应用包括: 系统概念研究、系统的可行性研究、系统的分析与设计、系统开发、系统测试与评估、系统操作人员的培训、系统预测、系统的使用与维护等各个方面。它的应用领域已经发展到军用以及与国民经济相关的各个重要领域。

(1) 军事领域。主要有以下几个方面。

- 武器装备研制。仿真技术在武器装备研制过程中,使得在新武器研制计划开始前,能够充分利用仿真系统检验武器系统的设计方案和战术、技术性能的合理性,避免在实际研制过程中出现的方案的不合理现象,缩短研制周期,并支持技术评估、系统更新、样机研制,使得能够以较低的代价提高武器装备的战术性能。各用户(包括武器装备的研制部门、采购部门、训练部门和军事使用部门)可在合成环境中按需要综合应用各种仿真手段进行演习、训练和试验,鉴定现有的和研制中的武器装备的性能、战术部署和后勤保障。现在,在武器装备研制生产过程中,已规定将仿真系统列为必需的装备。

- 军事训练。分布式仿真系统通过联网技术将分散在各地的人、在回路中的仿真器、计算机生成的兵力以及其他设备联结为一个整体,形成一个可以在时间和空间上互相耦合的虚拟战场合成环境,参与者可以自由地交互作用。这样,使过去主要依靠野战演习完成的任务可以利用计算机、仿真器和人工合成的虚拟环境来进行。技术的进一步发展还将把野外演习的部队和这种仿真器联系起来进行演习。利用仿真器产生动态的、直观的环境,配合仿真的地形、烟雾和“敌人”的武器装备,使部队能够进行生动逼真的军事演习。

- 先进概念与军事需求分析。在先进概念与军事需求分析方面(例如使用新概念与先进技术的试验),对于未来军事行动中在条令、训练、指挥人员培养、组织、装备和士兵发展等方面的需求上,可以通过仿真和使用真实部队的士兵体验来评估技术综合集成的影响。

(2) 工业领域。同军事领域的需求和推动一样,由于工业系统的复杂性、大型化,出于安全性、经济性考虑,仿真技术广泛应用于工业领域的各个部门。在大型复杂工程系统(项目)建设之前的概念研究与系统的需求分析过程中,都发挥着越来越重要的作用。在电力工业中,随着单元发电机组容量越来越大,系统越来越复杂,对它的经济运行、安全生产提出

了更高的要求,仿真系统是实现这个目的的最佳途径。通过仿真系统可以优化运行过程,可以培训操作人员。电站仿真系统已成为电站建设与运行中必须配套的装备。核电站的运行必须安全,操作人员的技术素质、技能是保证安全运行的前提,培训提高操作人员素质、技能的有效手段是仿真培训系统。

在经济全球化、贸易自由化和社会信息化的今天,在技术更新速度加快的新形势下,制造业的经营战略发生了很大变化。如何在最短的时间内,以最经济的手段开发出用户能够接受的产品,已成为今天市场竞争的焦点。虚拟制造是解决这个焦点问题的有效技术途径。虚拟制造是采用建模技术在计算机及高速网络支持下,在计算机群组协同工作下,通过三维模型及动画实现产品设计、工艺规划、加工制造、性能分析、质量检验以及企业各级过程的管理与控制的仿真产品制造过程。虚拟制造是对已有的或未来的制造活动进行的仿真过程,所进行的过程是仿真的,所生产的产品也是仿真的。仿真技术将在制造企业中发挥重要的作用。

(3) 其他应用领域。在为武器系统研制作战训练和工业过程服务的同时,仿真技术的应用正不断向交通、教育、通信、社会、经济、娱乐等多个领域扩展。近年来,国内研制了能够表述交通流特征和交通流质量的交通仿真软件平台,可以对交通规划、交通控制设计、交通工程建设方案等进行预评估。在引黄入晋输水工程中,建立了全系统运行仿真系统,利用仿真系统验证了工程设计,提出了现有工程设计中影响运行的重大问题,寻找调度运行最佳模式等。

在医学仿真方面,建立了有关人体的生物学模型和三维视觉模型,为深入开展人体生命机理研究和远程医疗工作提供了有力的工具。为了满足大容量、高速度通信网络研究的需要,对通信仿真的方法和软件开展了广泛的研究,为提高通信网络的性能和网络方案的优化提供了重要的分析和验证工具。此外,仿真技术和虚拟现实技术在娱乐业中亦显示出广阔的发展前景。

归纳起来,仿真技术的主要用途有如下几点。

(1) 优化系统设计。在实际系统建立以前,通过改变仿真模型结构和调整系统参数来优化系统设计。如控制系统、数字信号处理系统的设计经常要靠仿真来优化系统性能。

(2) 系统故障再现,发现故障原因。实际系统故障的再现必然会带来某种危害性,这样做是不安全的和不经济的,利用仿真来再现系统故障则是安全的和经济的。

(3) 验证系统设计的正确性。

(4) 对系统或其子系统进行性能评价和分析。多为物理仿真,如飞机的疲劳试验。

1.1.3 仿真的基本步骤

1. 建立系统的数学模型

对于一些系统可以通过基本定律如牛顿定律、基尔霍夫定律来建立数学模型,而对很多系统,由于系统的复杂性,难于写出用数学表达式表示的数学模型,则必须利用实验方法获得实验数据,通过系统辨识技术建立数学模型。数学模型是系统仿真的研究依据,所以数学模型的准确性是十分重要的。

2. 建立仿真模型

一般的数学模型都不能直接编制程序并用计算机求解,通常必须把数学模型转换成适

宜编程并能在计算机上运行的模型——仿真模型,也就是需要通过一定的算法对原系统的数学模型进行离散化处理。就连续系统而言,就是建立相应的差分方程再由计算机进行求解。

3. 编制仿真程序

对于非实时仿真,可用高级语言依据相应的算法编程。而对于实时仿真往往采用汇编语言与高级语言共用的方式进行编程。

4. 程序调试、验证模型、实验结果分析并确定实验方案

(1) 调试程序。调试程序的首要任务是检查并纠正程序的错误,使其在计算机上运行通过,并保证程序处于正确的工作状态。

(2) 验证模型。通过运行程序,用仿真实验数据与实际系统运行观测的数据结果相比较的方法,检验、确认模型是否代表了实际系统,反映了实际系统运行过程的特性。

(3) 根据实验结果的分析,确定实验方案。选择合理的参数实验范围,安排用较少的实验次数来达到预期的效果。如果结果不符合原有的设计要求,就应寻找原因并通过修改程序或修改仿真模型,反复多次运行程序直至达到设计要求。

应当注意,仿真研究是一个动态迭代过程,需要通过迭代过程逐步获取系统特性的信息。

1.1.4 仿真技术的发展

计算机仿真技术的发展与控制工程、系统工程、计算机技术的发展密切相关。控制工程是计算机仿真技术较早的应用领域,其发展为系统仿真技术的形成和发展奠定了良好的基础。系统工程完善了建模与仿真的理论体系,使计算机仿真技术应用于非工程系统。计算机技术为计算机仿真的应用提供了强有力的工具和手段。仿真的发展历史可以归纳如下。

1. 建模方法学的发展

20 世纪 50—60 年代:工程系统(连续系统),建模采用以时间为基准的确定型数学模型——微分方程、差分方程。

20 世纪 70 年代:非工程系统(离散事件系统),数学模型能反映问题离散和随机的特点。

20 世纪 70 年代中期:齐格勒(B. P. zeigler)提出了模型的规范化和形式化描述理论,从此建模理论中引入了层次化建模和面向对象建模。

20 世纪 80 年代之后:神经网络建模、定性建模等。

目前人工智能等众多新学科都已应用于建模方法之中。

2. 仿真软件的发展

在计算机硬件飞速发展的同时,仿真软件也有很大的发展。近几十年来,仿真软件充分吸收了仿真方法学、计算机、网络、图形/图像、多媒体、软件工程、系统工程、自动控制和人工智能等技术成果,从而得到了很大发展。仿真软件也从初期的机器代码,历经较高级的编程语言、面向问题描述的仿真语言,发展到模块化概念,并进而发展到面向对象编程、图形化模块编程等。人机环境也由初期的图形支持,到动画、交互式仿真,进一步发展到矢量的图形支持,并向虚拟现实发展。仿真软件的发展基本经历了以下 5 个阶段。

(1) 通用程序设计语言。1960 年左右的 FORTRAN,以及具有适应并行处理功能的 Ada