



普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
自动化专业精品教材·优秀畅销书

# 计算机仿真技术与CAD

——基于MATLAB的控制系統 (第3版)

李国勇 主 编

程永强 副主编



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
自动化专业精品教材·优秀畅销书

# 计算机仿真技术与 CAD

——基于 MATLAB 的控制系统

(第 3 版)

李国勇 主 编  
程永强 副主编

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。全书全面论述控制系统计算机仿真的基本概念和原理,系统介绍了当前国际控制界最为流行的面向工程与科学计算的高级语言 MATLAB 及其动态仿真集成环境 Simulink,并以最新版 MATLAB/Simulink 为平台,详细阐述控制系统的数学模型及其转换、连续系统和离散系统的仿真方法、控制系统的计算机辅助分析与设计;最后特别介绍基于图形界面的 MATLAB 工具箱的线性 and 非线性控制系统设计方法。本书取材先进实用,讲解深入浅出,各章均有大量的例题,并提供了相应的仿真程序,便于读者掌握和巩固所学知识。

本书可作为高等院校自动化专业和电气信息类其他各专业本科生和研究生教材,也可作为从事自动控制及相关专业技术人员的参考用书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。  
版权所有,侵权必究。

### 图书在版编目(CIP)数据

计算机仿真技术与 CAD:基于 MATLAB 的控制系统/李国勇主编. —3 版. —北京:电子工业出版社,2012.2  
自动化专业精品教材:优秀畅销书  
ISBN 978-7-121-15342-6

I. ①计… II. ①李… III. ①控制系统-计算机仿真-软件包,MATLAB-高等学校-教材 IV. ①TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 248270 号

责任编辑:韩同平 特约编辑:李佩乾

印 刷:北京丰源印刷厂

装 订:三河市鹏成印业有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编:100036

开 本:787×1092 1/16 印张:21.25 字数:550 千字

印 次:2012 年 2 月第 1 次印刷

印 数:4 000 册 定价:39.80 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zlt@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

## 第 3 版前言

本书自 2003 年 9 月初版和 2008 年 1 月再版以来,深得广大读者的关心和支持,先后重印 10 多次,被国内多所大学选做教材。并入选普通高等教育“十一五”国家级教材规划。

这次修订在保持本书内容系统、实用、易读的特点,以及框架结构基本不变的基础上,充分考虑能适应新形势下计算机仿真技术类课程教学和适用于不同层次院校的需要,体现宽口径专业教育思想,反映先进的技术水平,强调教学实践的重要性,有利于学生自主学习和动手实践能力的培养,适应卓越工程师人才培养的要求。

本书具有如下特点:

### (1) 内容先进、符合规范

本书既考虑内容的先进性,又兼顾教材内容的稳定性。根据教育部高等学校自动化及其它电气信息类专业的专业规范和目前最新版本 MATLAB7. x 为基础来进行叙述。但同时排除了过渡性很强的内容使得本书的内容对更高版本的环境仍可完全适用。

### (2) 内容全面、结构合理

全书结构贯穿一条主线,以 MATLAB/Simulink 为平台,从系统建模、系统仿真,到系统分析和系统设计,将 MATLAB/Simulink 应用技术与控制理论有机地结合起来。本书内容涉及面广,几乎包括了计算机仿真、控制系计算机辅助分析与设计、MATLAB 和 Simulink 的所有基本内容和使用方法,但各部分内容力求精而简。各章均配有适当的例题和习题,并提供了相应的用 MATLAB 编写的仿真程序。

### (3) 便于教学、方便用户

本书既考虑了课堂教学使用,又兼顾了查阅功能。本书在叙述 MATLAB 通用功能时,对内容是精心挑选的,但在书后的索引中罗列了通用功能的几乎全部指令,以备读者查阅需要。面对 MATLAB 7. x 和 MATLAB 6. x 部分功能的较大变化,本书第 3 版仍然撰写了 MATLAB 7. 5 和 MATLAB 6. 5 两个不同经典版本的内容,以满足不同读者的需求。因为随着 MATLAB 的迅速变化,尽管目前最新版本 MATLAB 7. 13(R2011b)与版本 MATLAB 7. 5(R2007b)相比,其内容急剧扩充,但就其本教材所涉及的内容而言,它们并无本质性变化。另外,最新版本安装程序大,且运行速度慢,尤其是启动初始化时特慢。由于 MATLAB6. 5 占用空间小,启动速度快,运行时间短,且功能已满足一般使用者和教学大纲的要求,故它仍为当前较为流行的教学版本。

本教材适用学时数为 32 ~48(2 ~3 学分),各章节编排具有相对的独立性,便于教师和学生取舍,便于不同层次院校的不同专业选用。

本书由李国勇主编,程永强副主编。全书共 11 章,第 0 章由韩念琛编写;第 1 章由杨丽娟编写;第 2 章和第 3 章由郑晋平编写;第 4 章由郭咏梅编写;第 5 章由郭红戈编写;第 6 章、第 8 章和第 9 章由李国勇编写;第 7 章由韩晓霞编写;第 10 章由彭宏丽编写;附录 A 由赵山川编写;附录 B 由赵润章编写;其余部分由刘笑达编写。全书由李国勇和程永强整理定稿。

本书可作为高等院校自动化专业和电气信息类其他各专业本科生和研究生教材。鉴于本书的通用性和实用性教强,故也可作为从事自动控制及相关专业的教学、研究、设计人员和工程技术人员的参考用书。

由于作者水平有限,书中仍难免有遗漏与不当之处,故恳请有关专家、同行和广大读者批评指正。

编 者

# 目 录

第 0 章 绪论 .....	(1)
0.1 仿真技术简介 .....	(1)
0.2 计算机仿真技术的发展概况 .....	(3)
0.3 计算机仿真技术的应用 .....	(4)
0.4 控制系统计算机辅助设计的主要内容及其应用 .....	(5)
0.5 基于 MATLAB 的控制系统仿真的现状 .....	(6)
习题 .....	(7)
第 1 章 仿真软件——MATLAB .....	(8)
1.1 MATLAB 的功能特点 .....	(8)
1.2 MATLAB 的基本操作 .....	(12)
1.3 MATLAB 的控制语句 .....	(19)
1.3.1 循环语句 .....	(19)
1.3.2 程序流控制语句 .....	(20)
1.3.3 条件转移语句 .....	(21)
1.4 MATLAB 的绘图功能 .....	(23)
1.4.1 二维图形 .....	(23)
1.4.2 三维图形 .....	(28)
1.4.3 图像处理 .....	(30)
1.5 MATLAB 的数值运算 .....	(31)
1.5.1 矩阵运算 .....	(31)
1.5.2 向量运算 .....	(40)
1.5.3 关系和逻辑运算 .....	(42)
1.5.4 多项式运算 .....	(43)
1.5.5 数据分析 .....	(47)
1.5.6 函数极值 .....	(49)
1.5.7 代数方程求解 .....	(50)
1.5.8 微分方程求解 .....	(51)
1.5.9 函数积分 .....	(52)
1.6 MATLAB 的符号运算 .....	(53)
1.6.1 符号表达式的生成 .....	(54)
1.6.2 符号表达式的基本运算 .....	(55)
1.6.3 符号表达式的微积分 .....	(57)
1.6.4 符号表达式的变换 .....	(60)
1.6.5 符号表达式的求解 .....	(61)
1.7 MATLAB 的文件 I/O .....	(63)

1.7.1 处理二进制文件 .....	(63)
1.7.2 处理文本文件 .....	(66)
1.8 MATLAB 的图形界面 .....	(67)
1.9 MATLAB 编译器 .....	(69)
1.9.1 创建 MEX 文件 .....	(69)
1.9.2 创建 EXE 文件 .....	(71)
本章小结 .....	(72)
习题 .....	(73)
<b>第2章 控制系统的数学模型及其转换</b> .....	<b>(74)</b>
2.1 线性系统数学模型的基本描述方法 .....	(74)
2.2 系统数学模型间的相互转换 .....	(78)
2.3 系统模型的连接 .....	(84)
2.4 典型系统的生成 .....	(91)
2.5 系统的离散化和连续化 .....	(93)
2.6 系统的特性值 .....	(95)
本章小结 .....	(96)
习题 .....	(96)
<b>第3章 连续系统的数字仿真</b> .....	<b>(98)</b>
3.1 数值积分法 .....	(98)
3.1.1 欧拉法 .....	(98)
3.1.2 梯形法 .....	(99)
3.1.3 预估-校正法 .....	(99)
3.1.4 龙格-库塔法 .....	(99)
3.1.5 关于仿真数值积分法的几点讨论 .....	(101)
3.2 面向系统传递函数的仿真 .....	(102)
3.3 面向系统结构图的仿真 .....	(104)
3.3.1 典型环节的确定 .....	(104)
3.3.2 连接矩阵 .....	(105)
3.3.3 确定系统的状态方程 .....	(106)
3.3.4 面向结构图的数字仿真程序 .....	(107)
3.4 连续系统的快速仿真 .....	(108)
3.4.1 增广矩阵法的基本原理 .....	(109)
3.4.2 典型输入函数的增广矩阵 .....	(109)
本章小结 .....	(111)
习题 .....	(111)
<b>第4章 连续系统按环节离散化的数字仿真</b> .....	<b>(112)</b>
4.1 连续系统的离散化 .....	(112)
4.2 典型环节的离散系数及其差分方程 .....	(113)
4.3 非线性系统的数字仿真方法 .....	(115)
4.4 连续系统按环节离散化的数字仿真程序 .....	(117)

本章小结 .....	(120)
习题 .....	(120)
<b>第5章 采样控制系统的数字仿真 .....</b>	<b>(122)</b>
5.1 采样控制系统 .....	(122)
5.2 模拟调节器的数字化仿真方法 .....	(122)
5.3 采样控制系统的数字仿真程序 .....	(123)
5.3.1 数字控制器的程序实现 .....	(124)
5.3.2 连续部分的程序实现 .....	(124)
5.3.3 程序框图及仿真程序 .....	(125)
5.4 关于纯滞后环节的数字仿真 .....	(127)
本章小结 .....	(128)
习题 .....	(128)
<b>第6章 动态仿真集成环境——Simulink .....</b>	<b>(130)</b>
6.1 Simulink 简介 .....	(130)
6.1.1 Simulink 的启动 .....	(130)
6.1.2 Simulink 库浏览窗口的功能菜单 .....	(131)
6.1.3 仿真模块集 .....	(131)
6.2 模型的构造 .....	(145)
6.2.1 模型编辑窗口 .....	(145)
6.2.2 对象的选定 .....	(147)
6.2.3 模块的操作 .....	(148)
6.2.4 模块间的连线 .....	(149)
6.2.5 模型的保存 .....	(149)
6.2.6 模块名字的处理 .....	(150)
6.2.7 模块内部参数的修改 .....	(151)
6.2.8 模块的标量扩展 .....	(151)
6.3 连续系统的数字仿真 .....	(152)
6.3.1 利用 Simulink 菜单命令进行仿真 .....	(152)
6.3.2 仿真结果分析 .....	(158)
6.3.3 利用 MATLAB 的指令操作方式进行仿真 .....	(162)
6.3.4 模块参数的动态交换 .....	(164)
6.3.5 Simulink 调试器 .....	(166)
6.4 离散系统的数字仿真 .....	(167)
6.5 仿真系统的线性化模型 .....	(170)
6.6 创建子系统 .....	(174)
6.7 封装编辑器 .....	(176)
6.7.1 参数(Parameters)页面 .....	(176)
6.7.2 图标(Icon)页面 .....	(178)
6.7.3 初始化(Initialization)页面 .....	(180)
6.7.4 描述(Documentation)页面 .....	(180)



6.7.5 功能按钮 .....	(180)
6.8 条件子系统 .....	(182)
本章小结 .....	(187)
习题 .....	(187)
<b>第7章 控制系统的计算机辅助分析 .....</b>	<b>(189)</b>
7.1 控制系统的稳定性分析 .....	(189)
7.2 控制系统的时域分析 .....	(192)
7.3 根轨迹分析 .....	(199)
7.4 控制系统的频域分析 .....	(202)
7.5 系统的能控性和能观测性分析 .....	(214)
7.5.1 系统的能控性和能观测性 .....	(214)
7.5.2 将系统按能控和不能控进行分解 .....	(216)
7.5.3 将系统按能观测性和不能观测性进行分解 .....	(216)
7.6 系统模型的降阶 .....	(217)
7.6.1 平衡实现 .....	(217)
7.6.2 模型降阶 .....	(218)
本章小结 .....	(220)
习题 .....	(220)
<b>第8章 控制系统的计算机辅助设计 .....</b>	<b>(222)</b>
8.1 频率法的串联校正 .....	(222)
8.1.1 基于频率响应法的串联超前校正 .....	(222)
8.1.2 基于频率响应法的串联滞后校正 .....	(225)
8.1.3 基于频率响应法的串联滞后-超前校正 .....	(228)
8.2 状态反馈和状态观测器的设计 .....	(231)
8.2.1 状态反馈 .....	(232)
8.2.2 状态观测器 .....	(234)
8.2.3 带状态观测器的状态反馈系统 .....	(238)
8.2.4 离散系统的极点配置和状态观测器 .....	(239)
8.2.5 系统解耦 .....	(240)
8.2.6 系统估计器 .....	(244)
8.2.7 系统控制器 .....	(244)
8.3 最优控制系统设计 .....	(245)
8.3.1 状态反馈的线性二次型最优控制 .....	(245)
8.3.2 输出反馈的线性二次型最优控制 .....	(250)
本章小结 .....	(251)
习题 .....	(252)
<b>第9章 基于 MATLAB 工具箱的控制系统设计 .....</b>	<b>(253)</b>
9.1 控制系统工具箱简介 .....	(253)
9.2 线性时不变系统的对象模型 .....	(254)
9.2.1 LTI 对象 .....	(254)

9.2.2	模型建立及模型转换函数 .....	(255)
9.2.3	LTI 对象属性的存取和设置 .....	(259)
9.3	线性时不变系统浏览器——LTI Viewer .....	(262)
9.4	单输入单输出系统设计工具——SISO Design Tool .....	(266)
9.4.1	MATLAB 7.5 的 SISO Design Tool .....	(267)
9.4.2	MATLAB 6.5 的 SISO Design Tool .....	(273)
9.5	非线性控制系统设计 .....	(277)
9.5.1	MATLAB 7.5 版的 Signal Constraint 模块及其应用 .....	(277)
9.5.2	MATLAB 6.5 版的 NCD Blockset 模块及其应用 .....	(285)
9.5.3	求解其他非线性控制系统的设计问题 .....	(290)
	本章小结 .....	(292)
	习题 .....	(292)
<b>第 10 章</b>	<b>Simulink 的扩展工具——S-函数</b> .....	<b>(293)</b>
10.1	S-函数简介 .....	(293)
10.2	S-函数的建立 .....	(296)
10.2.1	用 M 文件创建 S-函数 .....	(297)
10.2.2	用 C 语言创建 S-函数 .....	(307)
10.3	S-函数编译器 .....	(313)
10.4	S-函数包装程序 .....	(315)
	本章小结 .....	(316)
	习题 .....	(316)
<b>附录 A</b>	<b>MATLAB 函数一览表</b> .....	<b>(317)</b>
<b>附录 B</b>	<b>MATLAB 函数分类索引</b> .....	<b>(325)</b>
<b>参考文献</b>	.....	<b>(330)</b>

# 第0章 绪 论

## 0.1 仿真技术简介

仿真技术是一门利用物理模型或数学模型模拟实际环境进行科学实验的技术,它具有经济、可靠、实用、安全、灵活和可多次重复使用的优点,目前已被广泛地应用于几乎所有的科学技术领域,成为分析、综合各种复杂系统的一种强有力的工具和手段。

在工业自动化领域,控制系统的分析、设计和系统调试、改造,大量应用仿真技术。例如,在设计前期,利用仿真技术论证方案,进行经济技术比较,优选合理方案;在设计阶段,仿真技术可帮助设计人员优选系统合理结构,优化系统参数,以期获得系统最优品质和性能;在调试阶段,利用仿真技术分析系统响应与参数关系,指导调试工作,可以迅速完成调试任务;在运行阶段,利用仿真技术可以在不影响生产的条件下分析系统的工作状态,预防事故发生,寻求改进薄弱环节,以提高系统的性能和运行效率。

对于比较简单的被控对象,可以直接在实际系统上进行实验和调整来获得较好的整定参数。但是在实际生产过程中,大部分的被控对象是比较复杂的,并且要考虑安全性、经济性以及进行实验研究的可能性等,这在现场实验中往往不易做到,甚至根本不允许这样做。例如研究导弹飞行、宇航、反应堆控制等系统时,不经模拟仿真实验就进行直接实验,将对人类的生命和健康带来很大的危险,这时,就需要利用实际系统的物理模型或数学模型进行研究,然后把对模型实验研究的结果应用到实际系统中去,这种方法就叫做模拟仿真研究,简称仿真。因此,仿真就是用模型(物理模型或数学模型)代替实际系统进行实验和研究。仿真所遵循的基本原则是相似原理,即几何相似、环境相似和性能相似。

依据相似原理,仿真可分为物理仿真、数学仿真和混合仿真。物理仿真就是应用几何相似原理,制作一个与实际系统相似但几何尺寸较小或较大的物理模型(例如飞机模型放在气流场相似的风洞中)进行实验研究。数学仿真是应用数学相似原理,构成数学模型在计算机上进行研究。它由软硬件仿真环境、动画、图形显示、输出打印设备等组成。在仿真研究中,数学仿真只要有一台数学仿真设备(如计算机等),就可以对不同的控制系统进行仿真实验和研究,而且,进行一次仿真实验研究的准备工作也比较简单,主要是被控系统的建模、控制方式的确立和计算机编程。而物理仿真则需要进行大量的设备制造、安装、接线及调试工作,其投资大、周期长、灵活性差、改变参数困难、模型难以重用,且实验数据处理也不方便。数学仿真实验所需的时间比物理仿真大大缩短,实验数据的处理也比物理仿真简单的多。但由于物理仿真具有信号连续、运算速度快、直观形象、可信度高等特点,故至今仍然广泛使用。混合仿真又称数学物理仿真,它是为了提高仿真的可信度或者针对一些难以建模的实体,在系统研究中往往把数学仿真、物理仿真和实体结合起来组成一个复杂的仿真系统,这种在仿真环节中有部分实物介入的混合仿真也称为半实物仿真或者半物理仿真。

由于数学仿真的主要工具是计算机,因此一般又称为“计算机仿真”。计算机仿真根据被研究系统的特征可分为两大类:连续系统仿真和离散事件系统仿真。前者可对系统建立用微

分方程或差分方程等描述的数学模型,并将其放在计算机上进行试验;后者面对的是由某种随机事件驱动引发状态变化的系统的数学模型(非数学方程式描述,通常用流程图或网络图描述),并将它放在计算机上进行试验。本书主要讨论非离散事件系统的计算机仿真。

计算机仿真能够为许多实验提供方便、灵活的“活的数学模型”,因此,凡是可以模型进行实验的,几乎都可以用计算机仿真来研究被仿真系统本身的各种特性,选择最佳参数和设计最合理的系统方案。所以随着计算机技术的发展,计算机仿真越来越广泛地得到应用。计算机仿真过程流程图如图 0-1 所示。

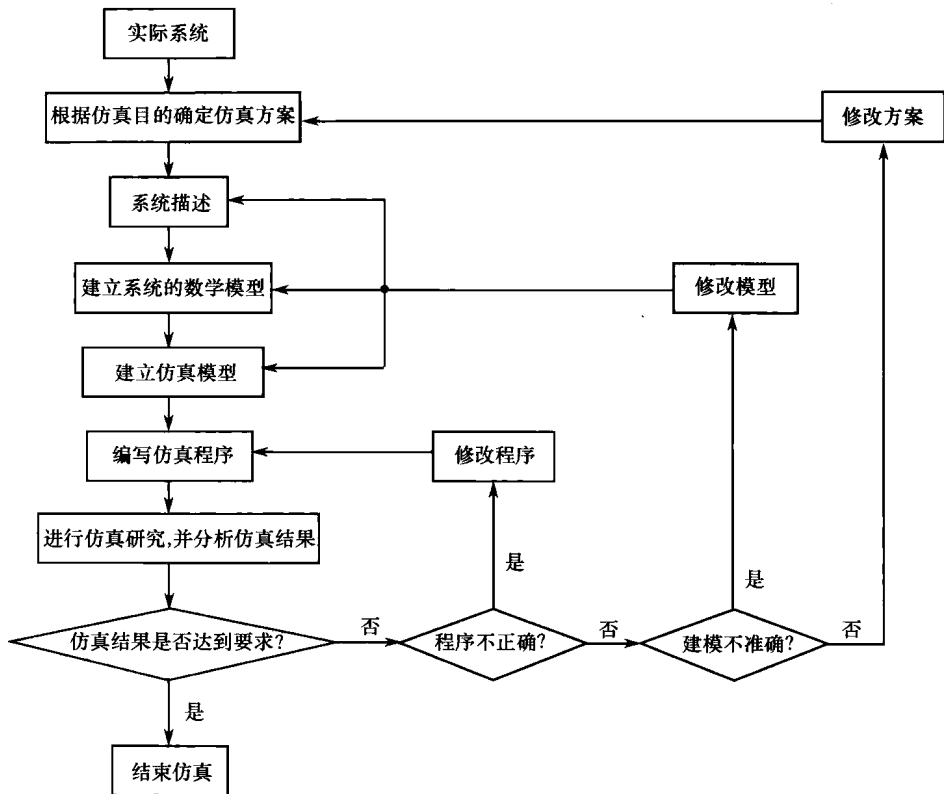


图 0-1 计算机仿真流程图

由图 0-1 可对计算机仿真的一般过程描述如下。

(1) 根据仿真目的确定仿真方案

根据仿真目的确定相应的仿真结构和方法,规定仿真的边界条件与约束条件。

(2) 建立系统的数学模型

对于简单的系统,可以通过某些基本定律来建立数学模型。而对于复杂的系统,则必须利用实验方法通过系统辨识技术来建立数学模型。数学模型是系统仿真的依据,所以数学模型的准确性十分重要。

(3) 建立仿真模型

就连续系统而言,就是通过一定算法对原系统的数学模型进行离散化处理,即建立相应的差分方程。

(4) 编写仿真程序

对于非实时仿真,可用一般高级语言或仿真语言。对于快速的实时仿真,往往需要用汇编

语言。

#### (5) 进行仿真实验

设定实验环境、条件,进行实验,并记录仿真数据。

#### (6) 仿真结果分析

根据实验要求和仿真目的对仿真结果进行分析处理,以便修正数学模型、仿真模型及仿真程序,或者修正/改变原型系统,以进行新的实验。模型是否能够正确地表示实际系统,并不是一次完成的,而是需要比较模型和实际系统的差异,通过不断地修正和验证而完成的。

通常,将实际系统抽象为数学模型,称之为一次模型化,它涉及系统辨识技术问题,又称为建模问题。将数学模型转化为可以在计算机上运行的仿真模型,称之为二次模型化,它涉及仿真编程、运行、修改参数等技术,又称为系统仿真技术。

## 0.2 计算机仿真技术的发展概况

### 1. 硬件发展

计算机仿真技术的发展,就硬件而言,大致经历了以下几个阶段。

20世纪40年代出现了模拟计算机,这时的计算机大都是用来设计飞机的专用计算机。20世纪50年代初,出现了通用的模拟计算机。20世纪50年代末,数字计算机有了很大发展,加上这一时期在微分方程数值解的理论方面又有很大的发展,所以在几种高级语言(如FORTRAN, ALGOL等)出现以后,在20世纪50年代末期,数字计算机便在非实时仿真方面开始得到广泛的应用。1958年为满足高速动态系统仿真的要求,出现了第1台专用的模拟/数字混合计算机,用来解决导弹轨迹的计算问题。20世纪60年代初期,出现了混合计算机商品。

近年以来,由于计算机技术的飞速发展,数字计算机已有可能解决高速动态系统的实时仿真问题,所以模拟/数字混合计算机将被数字计算机所取代。

### 2. 软件发展

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、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, C++等语言。

#### (2) 初级仿真语言阶段

1960—1970年面向框图的MIDAS;面向大型连续系统的仿真规范的CSSL(Continuous System Simulation Language);CSMP(Continuous System Modeling Program);基于差分方程模型的DYNAMO(Dynamic Models);基于离散事件的SIMLIB和CSL(Control and Simulation Language);还有以过程为基础的通用仿真系统GPSS(General purpose Simulation System)等。

#### (3) 高级仿真语言阶段

1970—1980年商用的连续系统仿真语言SSLIV, DAREP, ACSL,以及离散事件系统仿真语

言 GPSSIV, SIMCRIP III 和 SLAM 等。

#### (4) 一体化建模与仿真环境软件

如美国 Pritsket 于 1989 年推出的 TESS, 它是具有数据库, 而且能将数据存储与检索, 脚本仿真/数据采集, 数据分析报告和图形生成, 脚本动画, 网络模型输入, 运行控制, 数据管理八个部分组成一体化仿真软件环境。

#### (5) 智能化仿真软件环境

它于 20 世纪 80 年代后期问世, 由一体化仿真软件环境、专家系统、智能接口等组成, 并具有知识库、模型库、方法库、实验程序库和数据库, 该软件充分利用了 FORTRAN, C, Ada, LISP 等语言的优良特性。

到目前为止, 已形成了许多各具特色的仿真语言。其中美国 MathWorks 软件公司的动态仿真集成软件 Simulink 与该公司著名的 MATLAB 软件集成在一起, 成为当今最具影响力的控制系统应用软件。

## 0.3 计算机仿真技术的应用

计算机仿真技术的应用范围十分广泛。它不仅被应用于工程系统, 如控制系统的设计、分析和研究, 电力系统的可靠性研究, 化工流程的模拟, 造船、飞机、导弹等研制过程; 而且还被应用于非工程系统, 如用于研究社会经济、人口、污染、生物、医学系统等。仿真技术具有很高的科学研究价值和巨大的经济效益。由于其应用广泛及卓有成效, 在国际上成立国际仿真联合会 (International Association for Mathematic and Computer in Simulation, IAMCS)。我国也于 1989 年成立了系统仿真学会。国内外高等学校的工科专业普遍开设了计算机仿真类课程, 我国高等学校自动化学科更是在 2006 年的教学大纲中, 将计算机仿真类课程列为自动化专业的一门必修课程。

计算机仿真在系统研究中的重要性在于它不仅经济而且安全可靠。首先, 由于仿真技术在应用上的安全性, 使得航空、航天、核电站等成为仿真技术最早的和最主要的应用领域。特别是在军事领域, 新型的武器系统、大型的航空航天飞行器在其设计、定型过程中, 都要依靠仿真试验进行修改和完善。导弹、火箭的设计研制, 空战、电子战、攻防对抗等演练也都离不开仿真技术。其次, 从仿真的经济性考虑, 由于仿真往往是在计算机上模拟现实系统过程, 并可多次重复运行, 使得其经济性十分突出。据美国对“爱国者”等三个型号导弹的定型试验统计, 采用仿真试验可减少实弹发射试验次数约 43%, 节省费用达数亿美元。我国某种型号导弹在设计和定型过程中, 通过仿真试验就缩短研制时间近两年。我国电力系统应用火电厂单元机组模型仿真装置培训值班长和运行人员, 大大缩短了岗前培训时间并提高了人员的专业素质。采用模拟装置培训工作人员, 经济效益和社会效益也十分明显。另外, 从环境保护的角度考虑, 仿真技术也极具价值。例如, 现代核试验多数在计算机上进行仿真, 固然是由于计算机技术的发展使其得以在计算机上模拟, 但政治因素和环境因素才是进行核试验仿真的主要原因。通过仿真研究还可以预测系统的特性, 以及外界干扰的影响, 从而可以对制订控制方案和控制决策提供定量依据。

仿真技术在许多复杂工程系统的分析和设计研究中越来越成为不可缺少的工具。系统的复杂性主要体现在复杂的环境、复杂的对象和复杂的任务上。然而只要能够正确地建立系统的模型, 就能够对该系统进行充分的分析研究。另外, 仿真系统一旦建立就可重复利用, 特别

是对计算机仿真系统的修改非常方便。经过不断的仿真修正,逐渐深化对系统的认识,以采取相应的控制和决策,使系统处于科学的控制和管理之下。

近年来,由于问题域的扩展和仿真支持技术的发展,出现了一批新的研究热点:(1)面向对象的仿真方法,从人类认识世界的模式出发提供更自然直观的系统仿真框架;(2)分布式交互仿真通过计算机网络实现交互操作,构造时空一致合成的仿真环境,可对复杂、分布、综合的系统进行实时仿真;(3)定性仿真以非数字手段处理信息输入、建模、结果输出,建立定性模型;(4)人机和谐的仿真环境,发展可视化仿真、多媒体仿真和虚拟现实等。这些新技术、新方法必将孕育着仿真方法的新突破。

当前仿真研究的前沿课题主要有仿真与人工智能技术结合,以实现智能化的仿真系统、分布式仿真与仿真模型的并行处理、图形与动画仿真、面向用户、面向问题、面向实验的建模与仿真环境以及仿真支持系统等。

仿真是以相似性原理、控制论、信息技术及相关知识为基础,以计算机为工具,借助系统模型对真实系统进行实验研究的一门综合性技术。它涉及相似论、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。就控制系统的仿真而言,它是一门涉及控制理论、计算数学和计算机技术的综合性科学。

## 0.4 控制系统计算机辅助设计的主要内容及其应用

计算机辅助设计(Computer Aided Design, CAD)技术是随着计算机技术的发展应运而生的。一门应用型新技术,它涉及数字仿真、计算方法、显示与绘图及计算机等诸多内容,至今已有近40年的历史。CAD技术是在仿真技术的基础上发展起来的,最早使用的CAD软件包大部分是数字仿真软件包的推广。

### 1. 控制系统 CAD 的主要内容

控制系统CAD作为CAD技术在自动控制理论及自动控制系统分析与设计方面的应用分支,是本门课程的另一重要内容。CAD技术为控制系统的分析与设计开辟了广阔天地,它使得原来被人们认为难以应用的设计方法成为可能。根据所使用的数学工具,控制系统的分析与设计方法可以分为如下的两大类。

#### (1) 变换法(频域法)

变换法属经典控制理论范畴,主要适用于单输入单输出系统。变换法借助于传递函数,利用代数的方法(如Routh判据)判断系统的稳定性,并根据系统的根轨迹、Bode图和Nyquist图等概念与方法来进一步分析控制系统的稳定性和动静态特性。也可在此基础上,根据对系统品质指标的要求,选定一种校正装置的结构形式,利用参数优化的方法确定系统校正装置的参数。

#### (2) 状态空间法(时域法)

状态空间法为现代控制理论内容,适用于多变量控制系统的分析与设计。利用状态空间法设计控制系统的方法主要有两种。一种是最优设计方法,它包括最优控制规律的设计及状态的最优估计两个方面。另一种是基于对闭环系统的极点配置。

利用状态空间法对控制系统进行分析和设计的主要内容有:①系统的稳定性、能控性和能观测性的判断;②能控及能观测子系统的分解;③状态反馈与状态观测器的设计;④闭环

系统的极点配置;⑤ 线性二次型最优控制规律与卡尔曼滤波器的设计。

## 2. 控制系统 CAD 的应用

(1) 控制系统 CAD 可以广泛地应用于工业生产部门。利用它来帮助设计实际的控制系统,不仅可以缩短设计周期,而且能够设计出性能较好的控制系统。从而有助于改进产品质量和提高劳动生产率。

(2) 控制系统 CAD 对于从事自动控制的研究人员来说也是必不可少的工具和手段。借助于 CAD 程序,研究人员可以很方便地对控制系统进行不同方法的分析和研究。从而不仅可以验证控制系统理论,而且可以进一步完善并发展控制系统的设计方法。

(3) 控制系统 CAD 在控制系统教学中的应用也是十分明显的,借助于控制系统 CAD 程序,可以加深学生对控制系统理论的学习和理解。同时由于减少了许多繁杂的手工计算,从而可以提高学习效率。过去在课堂学习中只能举一些低阶系统和简单参数的例子,以便于手工能够计算。今天借助于计算机,更为接近实际的高阶系统也可作为学生的练习内容。从而使他们能得到更多的实际训练,较早地获得实际控制系统设计的经验。

为使控制系统 CAD 程序的使用更加方便和灵活,并进一步促进它的应用,很多国家都有计算机辅助设计控制系统的软件包。这些软件包不仅包括了控制系统的各方面的应用程序,而且通过软件包的管理程序,可以对所有程序和数据进行统一管理,并提供人机交互的功能。比较著名的软件包有:美国的 CSMP/360、加拿大的 GEMCOPE、英国的 UMIST、罗马尼亚的 SPIAC、日本的 DPACS-P 和美国的 MATLAB 等。

## 0.5 基于 MATLAB 的控制系统仿真的现状

作为一种面向科学与工程计算的高级语言, MATLAB 由于使用极其方便、而且提供丰富的矩阵处理功能,所以很快引起控制理论领域研究人员的高度重视,并在此基础上开发了控制理论与 CAD 和图形化模块化设计方法相结合的控制系统的仿真工具箱,目前它已成为国际控制界最流行的计算机仿真与 CAD 语言。

MATLAB 可以在各种类型的机型上运行,如 PC 及兼容机、Macintosh 及 Sun 工作站、VAX 机、Apollo 工作站、HP 工作站、DECstation 工作站、SGI 工作站、RS/6000 工作站、Convex 工作站及 Cray 计算机等。使用 MATLAB 语言进行编程,可以不做任何修改直接移植到这些机器上运行,它与机器类型无关。这大大拓宽了 MATLAB 语言的应用范围。

MATLAB 语言除可以进行传统的交互式编程来设计控制系统以外,还可以调用它的控制系统工具箱来设计控制系统。许多使用者还结合自己的研究领域将擅长的 CAD 方法与 MATLAB 结合起来,制作了大量的控制系统工具箱,如控制系统工具箱、系统辨识工具箱、鲁棒控制工具箱、模型预测控制工具箱、神经网络工具箱、优化工具箱、模糊逻辑工具箱和遗传算法与直接搜索工具箱等。可以说伴随着控制理论的不断发展和完善, MATLAB 的工具箱也在不断地增加和完善。MATLAB 的 Simulink 和 Stateflow 功能的增加使控制系统的设计更加简便和轻松,而且可以设计更为复杂的控制系统。用 MATLAB 设计出控制系统进行仿真后,可以利用 MATLAB 的工具在线生成 C 语言代码,用于实时控制。可以毫不夸张地说, MATLAB 已不仅是一般的编程工具,而是作为一种控制系统的设计平台出现的。目前,许多工业控制软件的设计就明确提出了与 MATLAB 的兼容性。



MATLAB 及其工具箱将一个优秀软件包的易用性、可靠性、通用性和专业性,以及以一般目的应用和高深的专业应用完美地集成在一起,并凭借其强大的功能,先进的技术和广泛的应用,使其逐渐成为国际性的计算标准,为世界各地数十万名科学家和工程师所采用。今天, MATLAB 的用户团体几乎遍及世界各大学、公司和政府研究部门,其应用也已遍及现代科学和技术的方方面面。

下面是 MATLAB 的几个典型应用,由此可见一斑。

瑞典 Lunds 大学反射物理学研究所在一项为期 3 个月的极地探险计划中广泛使用 MATLAB 及其工具箱,在北冰洋研究放射性物质对环境生态学的影响。研究人员主要用 MATLAB 进行数据分析,用神经网络工具箱辨识北冰洋流木的年轮图案,并据此识别这些漂流数年的树木成长自何方。

Forsmark 核电站使用 MATLAB 优化反应堆的功率输出。工程师们从堆芯读取大量数据,算出燃料棒和控制棒的最佳位置,以便产生最大的输出功率。这是一个极为庞大且十分复杂的数值分析问题,包括分析 17 000 个以上的节点。为了简化计算过程, Forsmark 用 MATLAB 开发出他们自己的图形用户界面,这个图形用户界面容许没有任何使用经验的使用者执行计算和评价分析结果。 Forsmark 还使用 MATLAB 建模和分析各种设想的失效及扰动情况。在反应堆中当发生扰动时,数据必须被详细分析,以便确定扰动的原由。借助于 MATLAB 和它的系统辨识及控制工具箱, Forsmark 的工程师们将分析时间从原来的 1 周减少到现在的 15 min。

Calspan 先进技术中心试验高度可修改的实验型飞行器,它可以成倍地提高其他飞行器的性能。其仿真程序运行在一组并行操作的浮点 DSP 上,所用硬件来自 DSPACE。飞行器和飞行控制系统首先在地面用 Simulink 模块建模、仿真,然后用实时 Workshop 生成 C 源代码并被下载到飞行器的 DSP 上。当实验飞机飞行时,试飞员可以在飞机预先编好的程序 DSP 模块控制时评价飞行器和飞行控制系统,飞行中各种控制参数可以直接被调整并被下载给硬件做试验,这种形式的实时试验节省大量时间和经费,一个飞行控制系统在其原型被建立之前就可以完成几乎全部试验。

## 习 题

- 0-1 什么是仿真?它所遵循的的基本原则是什么?
- 0-2 仿真的分类有几种?为什么?
- 0-3 比较物理仿真和数学仿真的优缺点。
- 0-4 简述计算机仿真的过程。
- 0-5 什么是 CAD 技术?控制系统 CAD 可解决哪些问题?