



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



电子信息与电气学科规划教材·自动化专业

计算机仿真技术与CAD

——基于MATLAB的控制系统

(第2版)

李国勇 谢克明 杨丽娟 编著



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
电子信息与电气学科规划教材·自动化专业

计算机仿真技术与 CAD

——基于 MATLAB 的控制系统

(第 2 版)

李国勇 谢克明 杨丽娟 编著

電子工業出版社

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 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,谢克明,杨丽娟编著. —2 版.

—北京:电子工业出版社,2008.1

(电子信息与电气学科规划教材·自动化专业)

ISBN 978-7-121-05348-1

I. 计… II. ①李…②谢…③杨… III. 控制系统—计算机辅助计算—软件包, MATLAB—高等学校—教材 IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 175799 号

责任编辑:韩同平 特约编辑:李佩乾

印 刷: 北京牛山世兴印刷厂
装 订:

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:544 千字

印 次:2008 年 1 月第 1 次印刷

印 数:4000 册 定价:29.80 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。

前 言

《控制系统数字仿真与 CAD》自 2003 年 9 月出版以来,得到了广大读者的关心和支持,先后多次重印,被国内多所大学选做教材,并入选普通高等教育“十五”国家级规划教材。

计算机仿真技术类课程是自动化专业及电气信息类有关专业的一门主干课程。根据高等学校自动化专业发展与教学改革的需要,为构建“课程设置合理、内容先进、体系科学”的自动化专业课程体系,编写符合自动化专业培养目标和教学改革要求的自动化专业教材,对本教材进行了修订,并将原书名改为《计算机仿真技术与 CAD——基于 MATLAB 的控制系统》。本次修订在对自动化专业课程体系和教学内容进行深入研究的基础上,充分考虑自动化专业教学计划的需要,能满足多学科交叉背景学生的教学需求,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,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选学需要。

这次修订在保持原书系统、实用、易读的特点和基本框架基础上,主要做了以下几方面的修改和补充:

① 在第 1 章仿真软件——MATLAB 中,补充了部分 MATLAB 数值运算内容;另外增加了 MATLAB 符号运算、MATLAB 图形用户界面(GUI)设计和 MATLAB 编译器等内容,使现有的 MATLAB 内容更加系统和完善。

② 在第 6 章动态仿真集成环境——Simulink 中,增加了 MATLAB 7.5.0(R2007b)版的新内容。

③ 在第 2 章控制系统的数学模型及其转换和第 7 章控制系统的计算机辅助分析中,对部分内容做了相应的调整,使其内容更加合理。

④ 对第 8 章中的部分程序增加了注释。

⑤ 为了便于系统教学,将第 10 章基于 MATLAB 工具箱的控制系统分析与设计改为第 9 章,使第 7,8,9 章内容相连贯,并在该章增加了 MATLAB 7.5.0(R2007b)版的新内容,但同时也保留了 MATLAB 6.5 版的部分内容。

⑥ 将第 9 章 Simulink 的扩展工具——S-函数改为第 10 章,并根据 MATLAB 7.5.0(R2007b)版的特点,对部分内容做了相应的修改。

⑦ 在每章中,均增加了相应的练习题,供读者独立操作,以便进一步掌握使用要领,提高独立工作能力和创造性思维能力。

总之,修订后的教材具有如下特点:

(1) 内容先进、符合教学大纲

本书既考虑了内容的先进性,又兼顾了教材内容的稳定性。本教材是根据教育部高等学校自动化专业教学规范和目前最新版本 MATLAB 7.5.0(R2007b)为基础来进行修订的。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。

第2版从内容上来说,涉及面更广,几乎包括了计算机仿真、控制系统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。本书尽管以目前最新版本 MATLAB 7.5.0(R2007b)为基础来进行叙述,但也同时兼顾了仍在较低配置计算机上使用 MATLAB 6.5 版本的用户。MATLAB 6.5 占用空间小,启动时间短,运行速度快,且功能已满足一般使用者和教学大纲的要求。在目前有些高校中,某些用于多媒体教学和实验的计算机不能及时更新,配置显得有些较低,故在教学演示中,广大师生仍喜欢采用 MATLAB 6.5,它仍为当前最为流行的教学版本。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。

本教材适用学时数为 32~48(2~3 学分),章节编排具有相对的独立性,便于取舍,便于不同层次院校的不同专业选用,以适应不同教学学时的需要。

全书共分 11 章,其中第 1 章系统且全面地介绍了仿真软件——MATLAB;第 2 章介绍了如何利用 MATLAB 实现控制系统的数学模型及其转换;第 3~5 章介绍了计算机仿真的基本概念和方法;第 6 章详细介绍了动态仿真集成环境——Simulink;第 7~8 章介绍了控制系统的计算机辅助分析与设计的基本原理和方法;第 9 章介绍了基于 MATLAB 工具箱的控制系统分析与设计;第 10 章介绍了 Simulink 的扩展工具——S 函数。本书各章均附有大量的例题,并提供了相应的用 MATLAB 编写的程序,便于读者掌握和巩固所学知识。

本书由李国勇、谢克明、杨丽娟编著,其中绪论和第 2 章由谢克明和李国勇编写,第 1 章由杨丽娟编写,其余章节和附录等由李国勇编写。全书由李国勇教授整理定稿。太原科技大学曾建潮教授主审了全书,提出了许多宝贵的意见和建议,在此深表谢意。

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较强,故也可作为从事自动控制及相关专业有关人员的参考用书。

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。

作 者

(TYGDLGY@163.com)

第 1 版前言

科学技术的发展使得各种系统的建模与仿真变得日益复杂起来。如何快速有效地构建系统并进行系统仿真,已经成为各领域学者急需解决的核心问题。特别是近几十年来,随着计算机技术的迅猛发展,数字仿真技术在各个领域都得到了广泛的应用与发展。而 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,它可轻易地再现 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来,而且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箱,且在各个领域都得到广泛的应用。

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,它是分析和设计各种复杂系统的强有力的工具。本书旨在使学生掌握这个先进的工具和方法,在比常规设计短得多的时间内获得系统的最优设计方案,为控制理论应用于工程实际架起一座桥梁。

本书是在我校自动化专业本科生和研究生中使用了 6 年的讲义——《控制系统的数字仿真及计算机辅助分析与设计》的基础上形成的。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工作的一些经验,对其做了多次修订与补充。

全书共分 11 章,包括:系统仿真的基本概念、MATLAB 和 Simulink 的基本内容及使用方法、控制系统的数学模型及其转换、连续系统的数字仿真、连续系统按环节离散化的数字仿真、采样控制系统的数字仿真、控制系统的计算机辅助分析与设计、基于图形界面的控制系统工具箱和非线性控制设计模块集及其具体应用。本书取材先进实用,讲解力求深入浅出,每章后面都有小结,各章均附有大量的例题,并提供了相应的用 MATLAB 编写的程序,便于读者掌握和巩固所学知识。

本书的绪论、第 1 章和第 2 章由谢克明编写,其余章节和附录等由李国勇编写。太原重型机械学院曾建潮教授主审全书,提出了许多宝贵的意见和建议,在此深表谢意。

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及研究生教材。鉴于本书的通用性和实用性较强,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,书中难免有遗漏与不当之处,恳请广大读者批评指正。

作 者
于太原理工大学

目 录

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)
1.5 MATLAB 的数值运算	(29)
1.5.1 矩阵运算	(29)
1.5.2 向量运算	(39)
1.5.3 关系和逻辑运算	(40)
1.5.4 多项式运算	(41)
1.5.5 数据分析	(46)
1.5.6 函数极值	(48)
1.5.7 代数方程求解	(49)
1.5.8 微分方程求解	(50)
1.5.9 函数积分	(51)
1.5.10 函数绘图	(52)
1.6 MATLAB 的符号运算	(53)
1.6.1 符号表达式的生成	(53)
1.6.2 符号表达式的基本运算	(54)
1.6.3 符号表达式的微积分	(56)
1.6.4 符号表达式的变换	(58)
1.6.5 符号表达式的求解	(59)
1.7 MATLAB 的图形界面	(61)

1.8 MATLAB 编译器	(63)
1.8.1 创建 MEX 文件	(63)
1.8.2 创建 EXE 文件	(65)
本章小结	(67)
习题	(67)
第 2 章 控制系统的数学模型及其转换	(69)
2.1 线性系统数学模型的基本描述方法	(69)
2.2 系统数学模型间的相互转换	(73)
2.3 系统模型的连接	(81)
2.4 典型系统的生成	(89)
2.5 系统的离散化和连续化	(91)
2.6 系统的特性值	(93)
本章小结	(95)
习题	(95)
第 3 章 连续系统的数字仿真	(97)
3.1 数值积分法	(97)
3.1.1 欧拉法	(97)
3.1.2 梯形法	(98)
3.1.3 预估-校正法	(98)
3.1.4 龙格-库塔法	(98)
3.1.5 关于仿真数值积分法的几点讨论	(100)
3.2 连续系统的数字仿真程序	(101)
3.3 面向系统结构图的仿真	(103)
3.3.1 典型环节的确定	(103)
3.3.2 连接矩阵	(104)
3.3.3 确定系统的状态方程	(105)
3.3.4 面向结构图的数字仿真程序	(106)
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	(108)
3.4.2 典型输入函数的增广矩阵	(108)
本章小结	(110)
习题	(110)
第 4 章 连续系统按环节离散化的数字仿真	(111)
4.1 连续系统的离散化	(111)
4.2 典型环节的离散系数及其差分方程	(112)
4.3 非线性系统的数字仿真方法	(114)
4.4 连续系统按环节离散化的数字仿真程序	(116)
本章小结	(119)
习题	(120)

第 5 章 采样控制系统的数字仿真	(121)
5.1 采样控制系统	(121)
5.2 模拟调节器的数字化仿真方法	(121)
5.3 采样控制系统的数字仿真程序	(122)
5.3.1 数字控制器的程序实现	(123)
5.3.2 连续部分的程序实现	(123)
5.3.3 程序框图及仿真程序	(124)
5.4 关于纯滞后环节的数字仿真	(126)
本章小结	(127)
习题	(127)
第 6 章 动态仿真集成环境——Simulink	(128)
6.1 Simulink 简介	(128)
6.1.1 Simulink 的启动	(128)
6.1.2 Simulink 库浏览窗口的功能菜单	(129)
6.1.3 仿真模块集	(129)
6.2 模型的构造	(143)
6.2.1 模型编辑窗口	(143)
6.2.2 对象的选定	(145)
6.2.3 模块的操作	(146)
6.2.4 模块间的连线	(147)
6.2.5 模型的保存	(147)
6.2.6 模块名字的处理	(148)
6.2.7 模块内部参数的修改	(149)
6.2.8 模块的标量扩展	(149)
6.3 连续系统的数字仿真	(150)
6.3.1 利用 Simulink 菜单命令进行仿真	(150)
6.3.2 仿真结果分析	(156)
6.3.3 利用 MATLAB 的指令操作方式进行仿真	(160)
6.3.4 模块参数的动态交换	(162)
6.3.5 Simulink 调试器	(164)
6.4 离散系统的数字仿真	(165)
6.5 仿真系统的线性化模型	(168)
6.6 创建子系统	(172)
6.7 封装编辑器	(174)
6.7.1 参数(Parameters)页面	(174)
6.7.2 图标(Icon)页面	(176)
6.7.3 初始化(Initialization)页面	(178)
6.7.4 描述(Documentation)页面	(178)
6.7.5 功能按钮	(178)
6.8 条件子系统	(180)

本章小结	(185)
习题	(185)
第 7 章 控制系统的计算机辅助分析	(187)
7.1 控制系统的稳定性分析	(187)
7.2 控制系统的时域分析	(190)
7.3 根轨迹法	(195)
7.4 控制系统的频域分析	(198)
7.5 系统的能控性和能观测性分析	(208)
7.5.1 系统的能控性和能观测性	(209)
7.5.2 将系统按能控和不能控进行分解	(210)
7.5.3 将系统按能观测性和不能观测性进行分解	(211)
7.6 系统模型的降阶	(212)
7.6.1 平衡实现	(213)
7.6.2 模型降阶	(214)
本章小结	(216)
习题	(216)
第 8 章 控制系统的计算机辅助设计	(218)
8.1 频率法的串联校正	(218)
8.1.1 基于频率响应法的串联超前校正	(218)
8.1.2 基于频率响应法的串联滞后校正	(221)
8.1.3 基于频率响应法的串联滞后-超前校正	(224)
8.2 状态反馈和状态观测器的设计	(228)
8.2.1 状态反馈	(228)
8.2.2 状态观测器	(230)
8.2.3 带状态观测器的状态反馈系统	(234)
8.2.4 离散系统的极点配置和状态观测器	(235)
8.2.5 系统解耦	(236)
8.2.6 系统估计器	(240)
8.2.7 系统控制器	(240)
8.3 最优控制系统设计	(241)
8.3.1 状态反馈的线性二次型最优控制	(241)
8.3.2 输出反馈的线性二次型最优控制	(246)
本章小结	(248)
习题	(248)
第 9 章 基于 MATLAB 工具箱的控制系统分析与设计	(249)
9.1 控制系统工具箱简介	(249)
9.2 线性时不变系统的对象模型	(250)
9.2.1 LTI 对象	(250)
9.2.2 模型建立及模型转换函数	(251)
9.2.3 LTI 对象属性的存取和设置	(256)

9.3 线性时不变系统浏览器——LTI Viewer	(258)
9.4 单输入单输出系统设计工具——SISO Design Tool	(263)
9.4.1 MATLAB 7.5 的 SISO Design Tool	(263)
9.4.2 MATLAB 6.5 的 SISO Design Tool	(269)
9.5 非线性控制系统设计	(274)
9.5.1 Signal Constraint 模块及其应用	(274)
9.5.2 NCD Blockset 模块及其应用	(281)
9.5.3 求解其他非线性控制系统的设计问题	(287)
本章小结	(288)
习题	(289)
第 10 章 Simulink 的扩展工具——S-函数	(290)
10.1 S-函数简介	(290)
10.2 S-函数的建立	(293)
10.2.1 用 M 文件创建 S-函数	(294)
10.2.2 用 C 语言创建 S-函数	(304)
10.3 S-函数编译器	(311)
10.4 S-函数包装程序	(312)
本章小结	(313)
习题	(313)
附录 A MATLAB 函数一览表	(314)
附录 B MATLAB 函数分类索引	(322)
参考文献	(327)

绪 论

0.1 仿真技术简介

自动控制系统是由被控对象、测量变送装置、执行器和控制器组成的。当选定测量变送装置和执行器后,对自动控制系统进行设计和分析研究,也就是对被控对象的动态特性进行分析和研究,然后根据被控对象的动态特性进行控制器的设计,以求获得满足性能指标要求的最优控制系统。在控制器类型确定后,分析和研究控制系统的主要目的之一是获得控制器的最佳整定参数。对于比较简单的被控对象,可以通过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,在研究导弹飞行、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,就需要对实际系统构建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。它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。依据这个原理,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(例如飞机模型放在与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得多。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。混合仿真又称物理-数学仿真,它是把数学仿真、物理仿真和实体结合起来,也就是将系统的一部分描述成数学模型,放入计算机,而其余部分则构建其物理模型或直接采用实体,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:连续系统仿真及离散事件系统仿真。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,通常是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。随着计算机技术的发展,计算机仿真得到越来越广泛的应用。

计算机仿真过程流程图如图 0-1 所示。

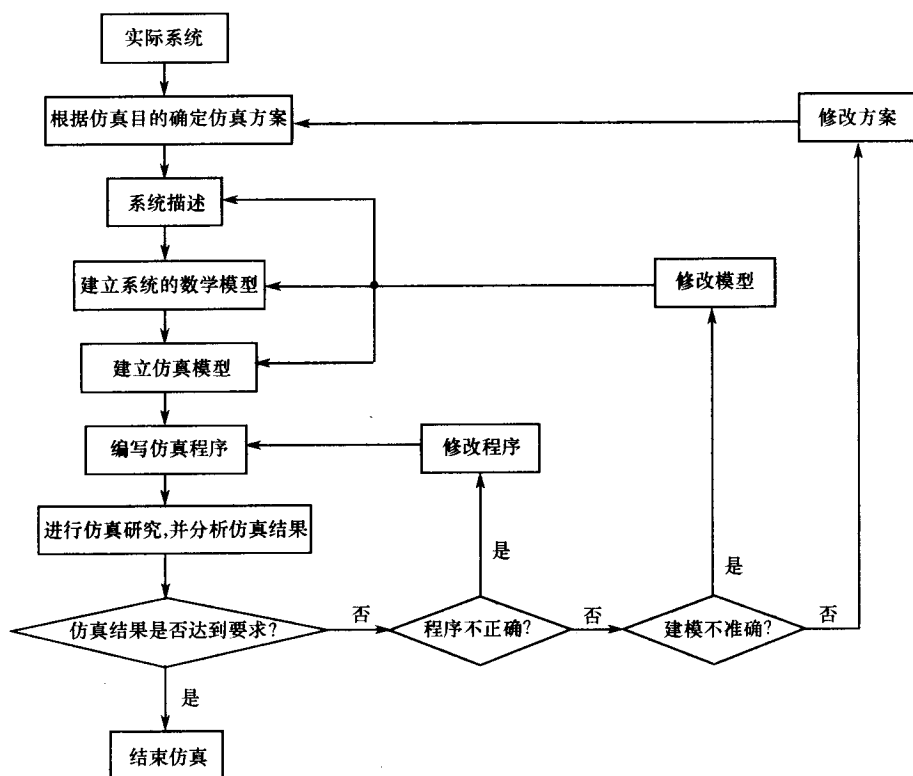


图 0-1 计算机仿真流程图

计算机仿真的一般过程可描述如下。

(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, SIMCRIPⅢ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 年代后期间世,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,是本门课程的另一个重要内容。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、多变量频域设计工具箱、神经网络工具箱、最优化工具箱、模糊控制工具箱等。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