



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材
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4版)

李国勇 主 编

程永强 副主编



中国工信出版集团



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”和“十二五”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4版)

李国勇 主 编 程永强 副主编



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”和“十二五”国家级规划教材。

本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 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及其他控制类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. —4 版. —北京:电子工业出版社,2016. 2
自动化专业精品教材
ISBN 978-7-121-27906-5

I. ①计… II. ①李… III. ①Matlab 软件-应用-自动控制系统-计算机仿真-高等学校-教材 IV. ①TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 307526 号

责任编辑:韩同平 特约编辑:李佩乾

印 刷:涿州市京南印刷厂

装 订:涿州市京南印刷厂

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 字数:605 千字

版 次:2003 年 9 月第 1 版

2016 年 2 月第 4 版

印 次:2016 年 2 月第 1 次印刷

定 价:49.90 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,联系及购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@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 4 版前言

本书自 2003 年 9 月初版和 2008 年 1 月及 2012 年 2 月的两次再版以来,深得广大读者的关心和支持,被国内多所高等学校选做教材,先后重印 14 次,累计印数 46000 册。再版教材被评为自动化专业精品教材和优秀畅销书,并先后入选普通高等教育“十一五”和“十二五”国家级教材规划。

这次修订在保持前三版内容系统、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选学需要,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。同时也符合自动化专业培养目标、反映自动化专业教育改革方向、满足自动化专业教学需要和满足多学科交叉背景学生的教学需求。

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 6. x/7. x/8. x 部分功能的较大变化,本书第 4 版撰写了 MATLAB 6. x、MATLAB 7. x 和 MATLAB 8. x 三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 8. 6 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。而 MATLAB 6. 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。

本书修订后从内容上来说: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。对于涉及本课程内容的 MATLAB 较大变化,本书都分别按其版本进行了介绍。各部分内容力求精而简,且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。

本教材适用学时数为 32 ~ 64 (2 ~ 4 学分),各章节编排具有相对的独立性,使教师与学生便于取舍,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。教材内容完善、新颖、有利于学生能力的培养。

本书由李国勇主编,程永强副主编。全书共包括 11 章和 2 个附录,其中第 0 章由程永强编写;第 1 章由李焱编写;第 2 章由续欣莹编写;第 3 章由李晔编写;第 4 章由郭红戈编写;第 5 章由阎高伟编写;第 6 章由杨丽娟编写;第 7 章由杨麦仓编写;第 8 章由王婷编写;第 9 章由李国勇编写;第 10 章由陈泽华编写;附录 A 由魏峰编写;附录 B 由郑晋平编写。全书由李国勇教授整理定稿。李虹教授主审了全书,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和控制类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(tygdly@163.com)。

作 者

目 录

第0章 绪论	1	1.5.10 函数积分	52
0.1 仿真技术简介	1	1.6 MATLAB 的符号运算	53
0.2 计算机仿真技术的发展概况	3	1.6.1 符号表达式的生成	53
0.3 计算机仿真技术的应用	4	1.6.2 符号表达式的基本运算	55
0.4 控制系统计算机辅助设计的主要 内容及其应用	5	1.6.3 符号表达式的微积分	57
0.5 基于 MATLAB 的控制系统仿真的 现状	6	1.6.4 符号表达式的变换	59
习题	7	1.6.5 符号表达式的求解	60
第1章 仿真软件——MATLAB	8	1.7 MATLAB 的文件 I/O	62
1.1 MATLAB 的功能特点	8	1.7.1 处理二进制文件	63
1.2 MATLAB 的基本操作	12	1.7.2 处理文本文件	65
1.2.1 语言结构	12	1.8 MATLAB 的图形界面	66
1.2.2 磁盘文件	14	1.8.1 启动 GUI Builder	67
1.2.3 库函数和数值显示格式	17	1.8.2 对象设计编辑器	67
1.2.4 基本输入输出函数	17	1.9 MATLAB 编译器	68
1.2.5 外部程序调用	18	1.9.1 创建 MEX 文件	68
1.3 MATLAB 的控制语句	19	1.9.2 创建 EXE 文件	70
1.3.1 循环语句	19	本章小结	72
1.3.2 程序流控制语句	20	习题	72
1.3.3 条件转移语句	21	第2章 控制系统的数学模型及其转换	74
1.4 MATLAB 的绘图功能	23	2.1 线性系统数学模型的基本描述 方法	74
1.4.1 二维图形	23	2.2 系统数学模型间的相互转换	78
1.4.2 三维图形	28	2.3 系统模型的连接	83
1.4.3 图像处理	29	2.4 典型系统的生成	90
1.5 MATLAB 的数值运算	30	2.5 系统的离散化和连续化	92
1.5.1 矩阵运算	30	2.6 系统的特性值	94
1.5.2 向量运算	39	本章小结	95
1.5.3 关系和逻辑运算	41	习题	95
1.5.4 多项式运算	42	第3章 连续系统的数字仿真	97
1.5.5 数据处理	44	3.1 数值积分法	97
1.5.6 数据分析	47	3.2 面向系统传递函数的仿真	101
1.5.7 函数极值	49	3.3 面向系统结构图的仿真	103
1.5.8 代数方程求解	50	3.4 连续系统的快速仿真	107
1.5.9 微分方程求解	51	本章小结	109
		习题	110

第4章 连续系统按环节离散化的数字仿真	111	6.6 创建子系统	171
4.1 连续系统的离散化	111	6.7 封装编辑器	173
4.2 典型环节的离散系数及其差分方程	112	6.7.1 参数(Parameters)页面	173
4.3 非线性系统的数字仿真方法	114	6.7.2 图标(Icon)页面	175
4.4 连续系统按环节离散化的数字仿真程序	116	6.7.3 初始化(Initialization)页面	176
本章小结	119	6.7.4 描述(Documentation)页面	177
习题	119	6.7.5 功能按钮	177
第5章 采样控制系统的数字仿真	120	6.8 条件子系统	179
5.1 采样控制系统	120	本章小结	183
5.2 模拟调节器的数字化仿真方法	120	习题	184
5.3 采样控制系统的数字仿真程序	121	第7章 控制系统的计算机辅助分析	185
5.4 关于纯滞后环节的数字仿真	125	7.1 控制系统的时域分析	185
本章小结	127	7.1.1 控制系统的稳定性	185
习题	127	7.1.2 控制系统的时域响应	188
第6章 动态仿真集成环境——Simulink ..	128	7.1.3 控制系统的稳态误差	194
6.1 Simulink 简介	128	7.2 根轨迹分析	195
6.1.1 Simulink 的启动	128	7.2.1 根轨迹的绘制	195
6.1.2 Simulink 库浏览窗口的功能菜单 ..	129	7.2.2 根轨迹的分析	195
6.1.3 仿真模块集	129	7.3 控制系统的频域分析	197
6.2 模型的构造	143	7.3.1 连续控制系统的频域分析	198
6.2.1 模型编辑窗口	143	7.3.2 离散控制系统的频域分析	202
6.2.2 对象的选定	145	7.3.3 时间延迟系统的频域分析	203
6.2.3 模块的操作	145	7.3.4 基于频率特性的系统辨识	204
6.2.4 模块间的连线	146	7.4 系统的能控性和能观测性分析	206
6.2.5 模型的保存	147	7.4.1 系统的能控性和能观测性	206
6.2.6 模块名字的处理	148	7.4.2 将系统按能控性和不能控性进行分解	208
6.2.7 模块内部参数的修改	148	7.4.3 将系统按能观测性和不能观测性进行分解	209
6.2.8 模块的标量扩展	149	7.5 系统模型的降阶	209
6.3 连续系统的数字仿真	150	7.5.1 平衡实现	210
6.3.1 利用 Simulink 菜单命令进行仿真 ..	150	7.5.2 模型降阶	211
6.3.2 利用 MATLAB 的指令操作方式进行仿真	160	本章小结	212
6.3.3 模块参数的动态交换	161	习题	213
6.3.4 Simulink 调试器	163	第8章 控制系统的计算机辅助设计	214
6.4 离散系统的数字仿真	165	8.1 频率法的串联校正	214
6.5 仿真系统的线性化模型	167	8.1.1 基于频率响应法的串联超前校正 ..	214
		8.1.2 基于频率响应法的串联滞后校正 ..	217
		8.1.3 基于频率响应法的串联滞后-超前校正	221

8.2 根轨迹法的串联校正	224	9.4 单输入单输出系统设计工具——SISO Design Tool	261
8.2.1 基于根轨迹法的串联超前校正	224	9.4.1 MATLAB 6. x 的 SISO Design Tool ...	261
8.2.2 基于根轨迹法的串联滞后校正	226	9.4.2 MATLAB 7. x/8. x 的 SISO Design Tool	265
8.2.3 基于根轨迹法的串联滞后-超前 校正	228	9.5 非线性控制系统设计	270
8.3 状态反馈和状态观测器的设计	230	9.5.1 NCD Blockset 模块及其应用	270
8.3.1 状态反馈	230	9.5.2 Signal Constraint 模块及其应用	276
8.3.2 状态观测器	233	9.5.3 Check Step Response Characteristics 模块及其应用	282
8.3.3 带状态观测器的状态反馈系统	236	9.5.4 其他非线性控制系统的设计 问题	289
8.3.4 离散系统的极点配置和状态 观测器	237	本章小结	290
8.3.5 系统解耦	238	习题	291
8.3.6 系统估计器	240	第 10 章 Simulink 的扩展工具—— S-函数	292
8.3.7 系统控制器	241	10.1 S-函数简介	292
8.4 最优控制系统设计	241	10.2 S-函数的建立	294
8.4.1 状态反馈的线性二次型最优控制 ...	242	10.2.1 用 M 文件创建 S-函数	296
8.4.2 输出反馈的线性二次型最优控制 ...	246	10.2.2 用 C 语言创建 S-函数	306
本章小结	248	10.3 S-函数编译器	312
习题	248	10.4 S-函数包装程序	313
第 9 章 基于 MATLAB 工具箱的控制 系统分析与设计	249	本章小结	314
9.1 控制系统工具箱简介	249	习题	314
9.2 线性时不变系统的对象模型	250	附录 A MATLAB 函数一览表	315
9.2.1 LTI 对象	250	附录 B MATLAB 函数分类索引	323
9.2.2 模型建立及模型转换函数	251	参考文献	328
9.2.3 LTI 对象属性的存取和设置	255		
9.3 线性时不变系统浏览器——LTI Viewer	257		

第0章 绪 论

控制系统的数字仿真是计算机应用的重要方面。它为控制系统的分析、研究和设计,以及自动控制的教育和训练提供了快速而又经济的手段。计算机辅助设计是在仿真技术的基础上发展起来的一门应用型技术。控制系统的数字仿真和计算机辅助设计是控制理论、计算数学和计算机科学三者有关方面的统一。它已成为自动控制学科的一个分支,并在自动控制技术的发展中起着重要的作用。

0.1 仿真技术简介

1. 仿真的意义

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。

2. 仿真的定义

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。

3. 仿真的分类

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,构建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。

4. 计算机仿真过程

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。计算机仿真流程图如图 0-1 所示。

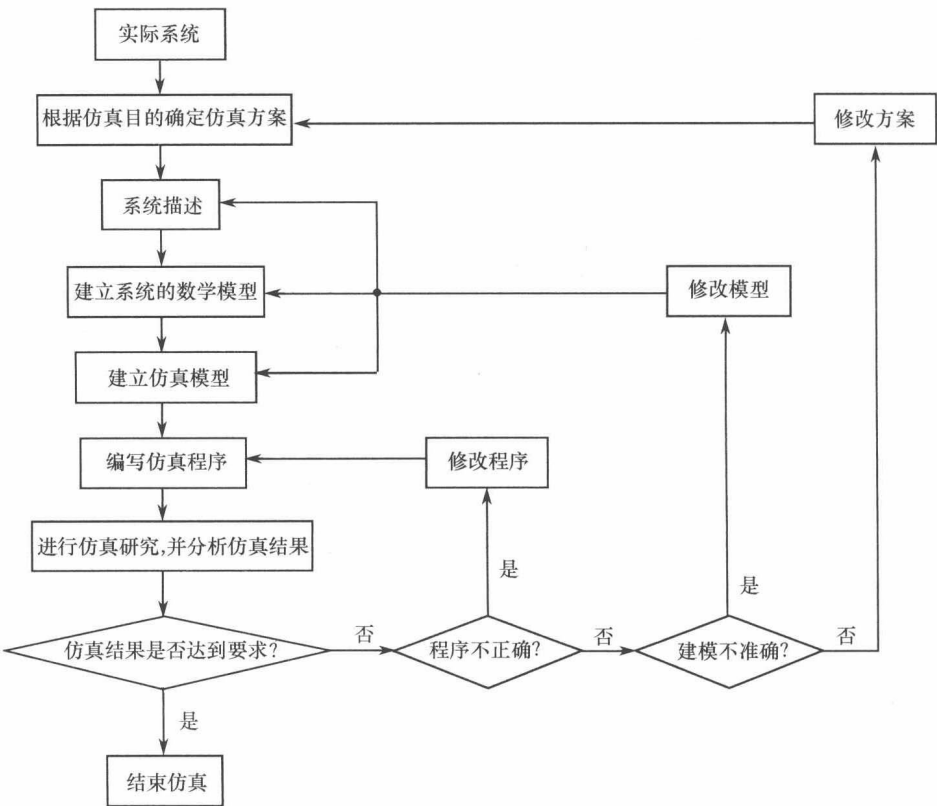


图 0-1 计算机仿真流程图

由图 0-1 所示的计算机仿真流程图,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(Modified Digital Analog Simulator);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 年代后期问世,由一体化仿真软件环境、专家系统、智能接口等几部分组成,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。由于其应用广泛且卓有成效,在国际上成立了国际仿真联合会(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。这样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 DPACSP 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、DEC 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,被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。

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?

第1章 仿真软件——MATLAB

MATLAB 是由美国 MathWorks 公司发布的主要面对科学计算、可视化以及交互式程序设计的高科技计算环境。它将数值分析、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。

1.1 MATLAB 的功能特点

MATLAB 是一种用于算法开发、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。使用它可以较使用传统的编程语言(如 C、C++ 和 Fortran)更快地解决技术计算问题。它的应用范围非常广,包括工程计算、控制系统设计、信号和图像处理、通信、测试和测量、金融建模和分析以及计算生物学等众多应用领域。附加的工具箱扩展了 MATLAB 环境,以解决这些应用领域内特定类型的问题。

1. MATLAB 简介

在科学研究和工程应用中,为了克服一般语言对大量的数学运算,尤其当涉及矩阵运算时,编程难、调试麻烦等困难,美国 MathWorks 公司于 1967 年构思并开发了“Matrix Laboratory”(缩写 MATLAB,即矩阵实验室)软件包,经过不断更新和扩充,该公司于 1984 年推出了正式版的 MATLAB 1.0。特别是 1992 年推出了具有划时代意义的 MATLAB 4.0 版,并于 1993 年推出了其微机版,以配合当时日益流行的 Microsoft Windows 一起使用。到 2015 年为止先后推出了微机版的 MATLAB 4.x、MATLAB 5.x、MATLAB 6.x、MATLAB 7.x 和 MATLAB 8.x,使之应用范围越来越广。欲查看 MATLAB 版本更新一览表请扫描右边二维码。



用 MATLAB 编程运算与人进行科学计算的思路和表达方式完全一致,所以使用 MATLAB 进行数学运算就像在草稿纸上演算数学题一样方便,因此,在某种意义上说,MATLAB 既像一种万能的、科学的数学运算“演算纸”,又像一种万能的计算器一样方便快捷。MATLAB 大大降低了对使用者的数学基础和计算机语言知识的要求,即使用户不懂 C 或 FORTRAN 这样的程序设计语言,也可使用 MATLAB 轻易的再现 C 或 FORTRAN 语言几乎全部的功能,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。

尽管 MATLAB 开始并不是为控制理论与系统的设计者们编写的,但以它“语言”化的数值计算、强大的矩阵处理及绘图功能、灵活的可扩充性和产业化的开发思路很快就为自动控制界研究人员所瞩目。目前,在自动控制、图像处理、语言处理、信号分析、振动理论、优化设计、时序分析、工程计算、生物医学工程和系统建模等领域,由著名专家与学者以 MATLAB 为基础开发的实用工具箱极大地丰富了 MATLAB 的内容。

MATLAB 包括拥有数百个内部函数的主包和几十种工具箱。工具箱又可以分为功能性工具箱和学科工具箱。功能工具箱用来扩充 MATLAB 的符号计算,可视化建模仿真,文字处理及实时

控制等功能。学科工具箱是专业性比较强的工具箱,如控制系统工具箱(Control System Toolbox),模糊逻辑工具箱(Fuzzy Logic Toolbox)和动态仿真工具箱(Simulink Toolbox)等。开放性使 MATLAB 广受用户欢迎,除内部函数外,所有 MATLAB 主包文件和各种工具箱都是可读可修改的文件,用户通过对源程序的修改或加入自己编写程序构造新的专用工具箱。较为常用的 MATLAB 工具箱可扫描右边二维码。

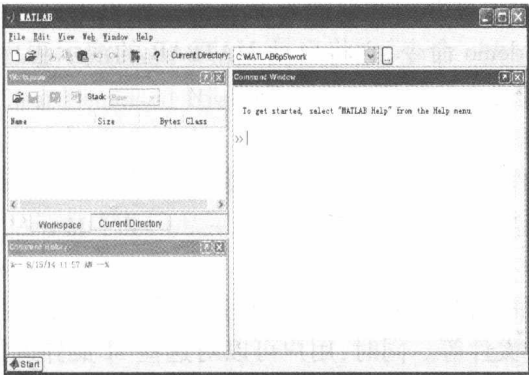


模型输入与仿真环境 Simulink 更使 MATLAB 为控制系统的仿真与 CAD 中的应用打开了崭新的局面,并使得 MATLAB 目前已经成为国际上最流行的控制系统计算机辅助设计的软件工具。MATLAB 不仅流行于控制界,在生物医学工程、语言处理、图像信号处理、雷达工程、信号分析、数学计算、金融统计和计算机技术等各行各业中都有极广泛的应用。

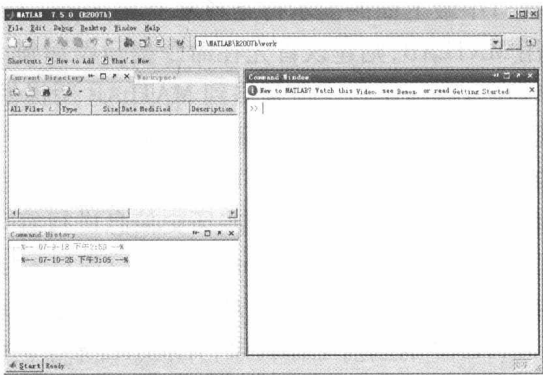
2. MATLAB 操作界面

一台计算机上可以同时安装多种 MATLAB 版本,各种版本之间相互独立运行互不干扰。使用 Windows XP 系统的用户需要安装 MATLAB 6.5 及以上的版本,否则不能正常使用。MATLAB 7.6 (R2008a) 以上的版本基本都兼容 Windows 7 及以上系统。高版本的 MATLAB 同时支持 32 和 64 位操作系统,安装包 win32 和 win64 两个文件夹分别与之对应。

目前几种较为常用的 MATLAB 版本启动后的操作界面如图 1-1 所示。



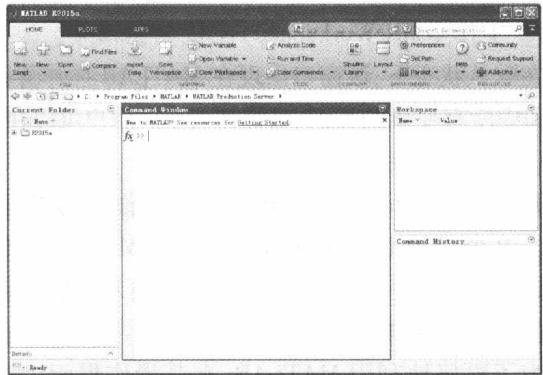
(a) MATLAB6.5



(b) MATLAB7.5(R2007b)



(c) MATLAB8.3(R2014a)



(d) MATLAB8.5(R2015a)

图 1-1 MATLAB 操作界面

由图 1-1 可知,MATLAB 各种版本的操作界面略有不同。MATLAB 6.5 以前版本的操作界面通常由工作窗口、功能菜单和工具栏等组成。在 MATLAB 6.5 和 MATLAB 7. x 操作界面的左下角中新增加了开始(Start)按钮。而在 MATLAB 8. x 操作界面中,又新设置了主页(HOME)、绘图(PLOTS)和应用程序(APPS)等 3 个页面,同时取消了左下角的开始按钮并将其主要操作命令合并

到应用程序页面中。其中主页中包含一些常用的功能菜单和快捷按钮;绘图页面中包含所有绘图函数;应用程序页面包含常用工具箱中的各种交互操作界面命令,其更加方便、实用和灵活。

由于最新版的新增功能大多对于本课程涉及的内容没有太大影响,再加上最新版本安装程序大、启动和运行速度较慢。另外,尽管 MATLAB 新版本的内容和功能有所增加,但其使用方法基本同前。特别指出的是, MATLAB 8.3(R2014a)等虽已将主操作界面汉化,并支持中文,便于读者自学,但其大多子操作界面和子菜单仍为英文,且主要功能的使用方法仍同于 MATLAB 7.x。故本书以下仍以目前流行的经典版本 MATLAB 7.5(R2007b)为基础来进行叙述,但增加了新版本与以前版本有较大变化且涉及本课程内容的部分,使得本书所述内容对使用最新版本的用户仍可完全适用,同时也兼顾了当前仍在较低配置计算机上使用较低版本 MATLAB 6.5 的用户。

(1) MATLAB 的工作窗口

在默认状态下, MATLAB 的工作窗口由命令窗口(Command Window)、历史命令窗口(Command History)、工作空间浏览器窗口(Workspace)和当前工作目录窗口(Current Directory)等组成。

① 命令窗口(Command Window)

MATLAB 的命令窗口位于 MATLAB 操作界面的右方,它是 MATLAB 的主要操作窗口, MATLAB 的大部分命令和结果都需要在此窗口中进行操作和显示。

MATLAB 命令窗口中的“>>”标志为 MATLAB 的命令提示符,“!”标志为输入字符提示符。命令窗口中最上面的提示行是显示有关 MATLAB 的信息介绍和帮助等命令的。如果用户是第一次使用 MATLAB,则建议首先在命令提示符后键入 demo 命令,它将启动 MATLAB 的演示程序,用户可以在这些演示程序中领略到 MATLAB 所提供的强大的运算和绘图功能。

② 历史命令(Command History)窗口

在默认状态下,该命令窗口出现在 MATLAB 操作界面的左下方。这个窗口记录用户已经操作过的各种命令,用户可以对这些历史信息进行编辑、复制和剪切等操作。

③ 当前工作目录(Current Directory)窗口

在默认状态下,该窗口出现在 MATLAB 操作界面的左上方的前台。在这个窗口中,用户可以设置 MATLAB 的当前工作目录,并展示目录中的 M 文件等。同时,用户可以对这些 M 文件进行编辑等操作。

④ 工作空间(Workspace)浏览器窗口

在默认状态下,该窗口出现在 MATLAB 操作界面的左上方的后台。在这个窗口中,用户可以查看工作空间中所有变量的类别、名称和大小。用户可以在这个窗口中观察、编辑和提取这些变量。

(2) 开始按钮

开始按钮(Start)位于 MATLAB 操作界面的左下角,单击这个按钮后,会出现 MATLAB 的操作菜单。这个菜单上半部分的选项包含 MATLAB 的各种交互操作命令,下半部分的选项的主要功能是窗口设置、访问 MATLAB 公司的网页和查看帮助文件等。

(3) 功能菜单

为了更好地利用 MATLAB,在其操作界面中设置了以下多个功能菜单。

● File——文件操作菜单

New	新建 M 文件、图形、模型和图形用户界面
Open	打开 .m, .fig, .mat, .mdl, .cdr 等文件
Close Command Window	关闭命令窗口
Import Data	从其他文件导入数据
Save Workspace As	保存工作空间数据到相应的路径文件窗口中