



高等学校电子与电气工程及其自动化专业“十一五”规划教材



控制系统仿真

主编 党宏社
主审 段晨东



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

内 容 简 介

本书根据控制系统的特點，重点阐述如何利用 MATLAB 工具解决实际工程问题。全书共分为 5 章，即控制系统仿真概述，MATLAB 基础及其使用初步，控制系统模型及转换，控制系统的仿真分析，控制系统仿真实验。

本书可作为自控、电子和通信类专业本科生的教材，也可供有关工程技术人员参考。

★本书配有电子教案，需要者可与出版社联系，免费提供。

图书在版编目(CIP)数据

控制系统仿真/党宏社主编. —西安:西安电子科技大学出版社, 2008.3

高等学校电子与电气工程及其自动化专业“十一五”规划教材

ISBN 978 - 7 - 5606 - 1946 - 0

I. 控… II. 党 III. 自动控制系统—数字仿真—高等学校—教材 IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 187472 号

策 划 马乐惠

责任编辑 杨宗周

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

http://www.xduph.com E-mail: xdupfxb@pub.xaonline.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西天意印务有限责任公司

版 次 2008 年 3 月第 1 版 2008 年 3 月第 1 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 15

字 数 351 千字

印 数 1~4000 册

定 价 21.00 元

ISBN 978 - 7 - 5606 - 1946 - 0/TN · 0397

XDUP 2238001 - 1

*** 如有印装问题可调换 ***

本社图书封面为激光防伪覆膜，谨防盗版。

高等学校

自动化、电气工程及其自动化、机械设计制造及其自动化专业 “十一五”规划教材编审专家委员会名单

主任：张永康

副主任：姜周曙 刘喜梅 柴光远

自动化组

组长：刘喜梅（兼）

成员：（成员按姓氏笔画排列）

韦力 王建中 巨永锋 孙强 陈在平 李正明
吴斌 杨马英 张九根 周玉国 党宏社 高嵩
秦付军 席爱民 穆向阳

电气工程组

组长：姜周曙（兼）

成员：（成员按姓氏笔画排列）

闫苏莉 李荣正 余健明
段晨东 郝润科 谭博学

机械设计制造组

组长：柴光远（兼）

成员：（成员按姓氏笔画排列）

刘战锋 刘晓婷 朱建公 朱若燕 何法江 李鹏飞
麦云飞 汪传生 张功学 张永康 胡小平 赵玉刚
柴国钟 原思聪 黄惟公 赫东锋 谭继文

项目策划：马乐惠

策划：毛红兵 马武装 马晓娟

前 言

仿真实验作为一种科学研究手段和实物实验的补充,具有不受设备和环境条件限制、不受时间与地点限制、不需要增加投资等特点而受到了人们越来越多的重视,也产生了多种专用和通用的仿真分析工具。MATLAB(矩阵实验室)作为一种编程语言和可视化工具,具有丰富的功能。它能解决工程、科学计算和数学学科中的许多问题,是目前高等院校与科研院所广泛使用的优秀应用软件。

本书以控制系统的分析和设计为对象,以 MATLAB 作为工具,既介绍了控制系统的特点与分析方法,又介绍了 MATLAB 的应用问题。考虑到目前大学教育的现状,本书在内容的安排上采取了以下几点处理办法:

(1) 理论讲授内容尽量少而精,重点阐述如何利用 MATLAB 工具解决实际工程问题,以适应有限学时的教学要求。

(2) 内容的安排与自控原理课程的内容一致,因此,本书既可以独立存在,也可以作为自控原理课程的仿真教材或辅助教材。

(3) 加强综合运用能力的培养,建立系统的概念。通过仿真实例使学生了解从系统建模到设计、仿真的全过程。

(4) 注重上机实践。本书设置了大量的实验内容和练习题,学生通过编程和上机练习,可进一步理解控制系统的基本理论和计算机辅助工具的用法及作用。

本书按照简化理论内容、强化练习的原则,给出了大量的仿真示例、实验和练习,读者可以根据自己的需要进行取舍。

在本书的编写过程中,得到了西安电子科技大学出版社编辑部马乐惠老师的大力支持和鼓励,使作者能顺利完成书稿;长安大学段展东教授仔细审阅了全稿,并给出了许多建设性的意见,使作者能及时修正书稿的不足;研究生寇强、党世红、李小瑞、胡尊凤、佟明、陈果、洪英、孙小平等完成了部分书稿的抄写与校对工作,韩琳同学对初稿进行了校对,并验证了大部分程序,提出了宝贵的修改意见;作者的多位同事也给予了不同形式的帮助和支持,在此,作者一并表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中难免存在一些不妥之处,恳请读者批评指正。

编者
2007年12月

目 录

第 1 章 控制系统仿真概述	1	第 3 章 控制系统模型及转换	37
1.1 系统与模型	1	3.1 系统数学模型及其转换	37
1.1.1 系统	1	3.1.1 系统的时域模型	37
1.1.2 系统模型	2	3.1.2 系统的传递函数模型	38
1.2 系统仿真的概念	3	3.1.3 系统的状态空间模型	39
1.2.1 仿真的定义	3	3.1.4 系统模型的其他形式	42
1.2.2 计算机仿真	4	3.1.5 典型环节及其传递函数	45
1.2.3 系统仿真三要素	5	3.1.6 自动控制系统的传递函数	47
1.3 系统仿真的类别与实现	5	3.1.7 系统的模型转换	49
1.3.1 系统仿真的分类	5	3.1.8 复杂模型的处理方法	54
1.3.2 控制系统仿真的过程	7	3.2 系统模型的连接	56
1.3.3 控制系统仿真的特点	8	3.2.1 模型串联	56
1.4 仿真技术的发展与应用	8	3.2.2 模型并联	58
1.4.1 系统仿真的发展	8	3.2.3 反馈连接	60
1.4.2 基于 MATLAB 的控制系统 仿真的现状	9	3.2.4 系统扩展	63
1.4.3 仿真技术发展的主要方向	10	3.3 状态空间模型实现	65
练习题	10	3.3.1 能控标准型实现	65
第 2 章 MATLAB 基础及其使用		3.3.2 能观标准型实现	67
初步	11	3.3.3 能控性与能观测性的定义	67
2.1 MATLAB 简介	11	3.3.4 对角线标准型实现	68
2.1.1 MATLAB 的发展历程和影 响力	11	3.3.5 系统能控性和能观性矩阵	70
2.1.2 MATLAB 的主要特点	11	3.3.6 系统的最小实现	71
2.1.3 MATLAB 组成与界面	12	3.3.7 控制系统的模型属性	71
2.2 MATLAB 编程	14	练习题	72
2.2.1 MATLAB 的基本语法	14	第 4 章 控制系统的仿真分析	74
2.2.2 MATLAB 函数	17	4.1 控制系统的稳定性分析	74
2.2.3 MATLAB 符号运算	19	4.1.1 间接判别法	75
2.2.4 MATLAB 绘图	20	4.1.2 直接判别法	76
2.3 Simulink 交互式仿真环境	27	4.2 控制系统的时域分析	86
2.3.1 Simulink 简介	27	4.2.1 时域分析的一般方法	86
2.3.2 Simulink 仿真基础	28	4.2.2 常用时域分析函数	91
2.3.3 Simulink 仿真举例	34	4.2.3 时域分析应用实例	103
练习题	35	4.3 控制系统的频域分析	112
		4.3.1 频域分析的基本概念	112
		4.3.2 频域分析常用函数	115

4.3.3 频域分析实例	129	5.6 控制系统的波特图	190
4.4 控制系统的根轨迹分析	142	5.7 控制系统的极坐标图	193
4.4.1 根轨迹的相关概念	143	5.8 连续系统的复频域分析	194
4.4.2 根轨迹分析函数	144	5.9 离散系统的 z 域分析	200
4.4.3 根轨迹分析应用实例	147	5.10 连续系统状态变量分析	207
4.5 控制系统的校正	156	5.11 离散系统状态方程求解	211
4.5.1 控制系统设计概述	156	5.12 频率法超前校正	214
4.5.2 基于根轨迹图的校正方法	157	5.13 频率法滞后校正	216
4.5.3 基于波特图的校正方法	161	5.14 根轨迹法超前校正	217
4.5.4 基于状态反馈的系统校正 方法	169	5.15 根轨迹法滞后校正	219
练习题	174	5.16 频率法二阶参考模型校正	220
第 5 章 控制系统仿真实验	177	5.17 速度反馈校正	221
5.1 MATLAB 平台认识实验	177	5.18 相平面作图	222
5.2 MATLAB 绘图	179	5.19 继电型非线性控制系统分析	224
5.3 控制系统的阶跃响应	182	5.20 采样控制系统分析	225
5.4 控制系统的脉冲响应	185	5.21 能控性、能观测性与其标准型	226
5.5 控制系统的根轨迹作图	187	5.22 线性二次型最优控制器设计	229
		参考文献	231

第1章 控制系统仿真概述

本章简要概述控制系统计算与仿真的基本知识。通过本章的介绍,使读者了解全书的概貌与本书的主要内容及任务。

1.1 系统与模型

1.1.1 系统

1. 系统的概念

所谓系统,是指物质世界中既相互制约又相互联系着的、以期实现某种目的的一个运动整体。

系统的范围很广,可谓包罗万象,例如由大地、山川、河流、海洋、森林和生物等组成了一个相互依存、相互制约且不断运动又保持平衡状态的整体,这就是自然系统。图1-1所示电路由电容、电感、电阻和电压源组成,是一个简单而又典型的电路系统。

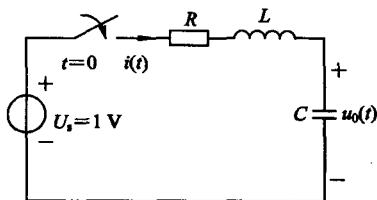


图1-1 电路系统

“系统”这一名词目前已广泛地应用在社会、经济、工业等各个领域。系统一般可分为非工程系统和工程系统。社会系统、国民经济系统、自然系统、交通管理系统等称做非工程系统,而工程系统则覆盖了机电、化工、热力、流体等工程应用领域。本书侧重于工程系统。

任何系统都存在三个方面的内容,即实体、属性和活动。组成系统的具体的对象或单元称为实体,如温度控制系统中的传感器、变送器、控制器、调节阀等;实体的特性(状态和参数)称为属性,如位移、速度、加速度、电流、电压等,可用来描述系统中各实体的性能;活动则是指对象随时间推移而发生的状态的变化,活动具有明显的时间概念。

2. 系统的类型

系统的类型与分类方法有关,常用的几种分类情况如下。

1) 静态系统和动态系统

静态系统是指相对不变的一类系统，如处于平衡状态下的一根梁，若无外界的干扰，则其平衡力是一个静态系统。系统的状态随时间改变的称为动态系统。如正在运行的温度控制系统，系统的各个参数都在不断变化，这样的系统就属于动态系统。

2) 确定系统和随机系统

状态和参数是确定的系统称为确定系统。而状态和参数是随机变化的系统，称为随机系统。即在既定的条件和活动下，系统从一种状态转换成另一种状态时是不确定的，而是带有一定的随机性质。

3) 连续系统和离散系统

随着时间的改变，状态的变化也是连续的系统称为连续系统，如一架飞机在空中飞行，其位置和速度相对于时间是连续改变的。若系统状态随时间呈间断改变或突然变化则称该系统为离散系统，例如，一个计算机系统完成计算作业离开处理机，转到外围设备排队等待输出结果，这个系统就属于离散型的。

在实际中，完全是连续或离散的系统是很少见的，大多数系统中既有连续成分，也有离散成分，不过对于大多数系统来说，在某种变化类型占优势时，我们就把它归为这一类系统。

4) 线性系统和非线性系统

系统中所有元器件的输入、输出特性都是线性的系统称做线性系统，而只要有一个元器件的输入、输出特性不是线性的，则该系统就称做非线性系统。系统的参数不随时间改变的称做定常系统，本课程的研究对象主要是线性定常系统。

1.1.2 系统模型

1. 系统模型

系统模型是对所要研究的系统在某些特定方面的抽象。系统模型实质上是由研究目的所确定的、关于系统某一方面本质属性的抽象和简化，并以某种表达形式来描述。模型可以描述系统的本质和内在的关系，通过对模型的分析研究，能够达到对原型系统的了解。

系统模型的建立是系统仿真的基础，而系统模型是以系统之间的相似性原理为基础的。相似性原理指出，对于自然界的任一系统，存在另一个系统，它们在某种意义上可以建立相似的数学描述或有相似的物理属性。一个系统可以用模型在某种意义上来近似，这是整个系统仿真的理论基础。

系统模型一般可以分为物理模型和数学模型两种。

2. 物理模型

物理模型是根据实际系统，利用实物建立起来的。物理模型与实际系统有相似的物理性质，这些模型可以是按比例缩小了的实物外形，如在风洞试验中的飞机外形和船体外形等，也可能是与原系统性能完全一致的样机模型，如生产过程中试制的样机模型就属于这一类。

3. 数学模型

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。

数学模型可分为机理模型、统计模型和混合模型。使用计算机对一个系统进行仿真研究时,利用的是系统的数学模型。

1.2 系统仿真的概念

1.2.1 仿真的定义

涉及仿真的有两个名词即“模拟”和“仿真”。“模拟”(Simulation)即选取一个物理的或抽象的系统的某些行为特征,用另一系统来表示它们的过程;“仿真”(Emulation)即用另一数据处理系统,主要是用硬件来全部或部分地模仿某一数据处理系统,以致于模仿的系统能够与被模仿的系统一样接受同样的数据,执行同样的程序,获得同样的结果。鉴于目前实际上已将上述“模拟”和“仿真”两者所含的内容都统归于“仿真”的范畴,而且都用英文“Simulation”一词来代表,因此本书所讨论的仿真概念也就这样泛指。

系统仿真目前还没有一个准确的定义,几个由专家和学者给出的定义有:

定义1 所谓系统仿真,是指利用模型对实际系统进行实验研究的过程,或者说,系统仿真是一种通过模型实验揭示系统原型的运动规律的方法。

这里的原型是指现实世界中某一待研究的对象,模型是指与原型的某一特征相似的另一客观对象,是对所要研究的系统在某些特定方面的抽象。通过模型来对原型系统进行研究,将具有更深刻、更集中的特点。

定义2 系统仿真是以系统数学模型为基础,以计算机为工具,对实际系统进行实验研究的一种方法。需要特别指出的是,系统仿真是用模型(即物理模型或数学模型)代替实际系统进行实验和研究,使仿真更具有实际意义。

定义3 系统仿真是建立在控制理论、相似理论、信息处理技术和计算技术等理论基础之上的,以计算机和其他专用物理效应设备为工具,利用系统模型对真实或假想的系统进行实验,并借助于专家经验知识、统计数据和信息资料对实验结果进行分析研究,进而做出决策的一门综合性的和实验性的学科。

简单而言,所谓系统仿真,就是进行模型实验,它是指通过系统模型的实验去研究一个已经存在的或正在设计中的系统的过程。仿真所遵循的基本原则是相似原理,包括数据相似、几何相似、环境相似与性能相似等。依据这个原理,仿真可分为物理仿真与数学仿真(也称为模拟计算机仿真与数字计算机仿真)。

要实现仿真,首先要寻找一个实际系统的“替身”,这个“替身”称为模型。它不是原型的复现,而是按研究的侧重面或实际需要,对系统进行简化提炼,以利于研究者抓住问题的本质或主要矛盾。据最新的统计资料表明,计算机仿真技术是当前应用最广泛的实用技术之一。

为了研究实际系统的动态性能,常常要采用数据相似原理。数据相似原理主要表现在:

- (1) 描述原型和模型的数学表达式在形式上完全相同。

(2) 变量之间存在着——对应的关系且成比例。

(3) 一个表达式的变量被另一个表达式中的相应变量置换后, 表达式内各项的系数保持相等。

系统仿真是近 40 年发展起来的一门综合性很强的新兴技术学科, 它涉及到各相关专业理论与技术, 例如系统分析、控制理论、计算方法和计算机技术等。当在实际系统上进行实验研究比较困难甚至无法实现时, 仿真技术就成了十分重要, 甚至是必不可少的工具, 它在现代科研、生产和教育训练等方面发挥着重大作用, 应用十分广泛。

1.2.2 计算机仿真

系统仿真一般有物理仿真和数学仿真之分。所谓数学仿真, 就是应用性能相似原理, 构造数学模型, 在计算机上进行实验研究。因此, 数学仿真也可以称做数字仿真或计算机仿真。

由于计算机仿真能够为各种实验提供方便、廉价、灵活而可靠的数学模型, 因此凡是利用模型进行实验的, 几乎都可以用计算机仿真来研究被仿真系统的工作特点、选择最佳参数和设计最合理的系统方案。

计算机仿真技术是以数学理论、相似原理、信息技术、系统技术及其与应用领域有关的专业技术为基础, 以计算机和各种物理效应设备为工具, 利用系统模型对实际的或设想的系统进行实验研究的一门综合性技术。计算机仿真技术集成了计算机技术、网络技术、图形图像技术、面向对象技术、多媒体、软件工程、信息处理、自动控制等多个高新技术领域的知识。

随着计算机技术的发展, 计算机仿真会越来越多地取代纯物理仿真。因此, 现在所称谓的仿真, 主要是指计算机参与的计算机仿真。计算机仿真是一门综合性的新学科, 它既取决于计算机工具本身硬件与软件的发展, 又依赖于仿真计算方法在精度与效率方面的研究与提高, 还要服从于对计算机仿真对象学科领域的发展需要。所以计算机仿真是多种学科互相渗透、相互融合又与多种学科相关联的边缘科学。

计算机仿真技术不仅限于系统生产集成后的性能测试实验, 仿真技术还应用于产品型号研制的全过程, 包括方案论证、技术指标论证、设计分析、生产制造、试验、维护、训练等各个阶段。仿真技术不仅仅应用于简单的单个系统, 也应用于由多个系统综合构成的复杂系统。

自动控制系统的计算机仿真, 是一门涉及到计算机技术、计算数学与控制理论、系统辨识、控制工程以及系统科学的综合性学科。它为控制系统的分析、计算、研究、综合设计以及自动控制的计算机辅助教学提供了快速、经济、科学和有效的手段。

计算机仿真技术的应用范围十分广泛, 它不仅应用于工程系统, 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, 国际上成立了国际仿真联合会 (IAMCS, International Association for Mathematic and Computer in Simulation)。

1.2.3 系统仿真三要素

仿真研究的对象是系统，而系统特性的表征主要采用与之相应的系统数学模型，放到计算机上进行相应的处理，就构成了完整的系统仿真过程。因此，将实际系统、数学模型、计算机称为系统仿真的三要素。其相互关系可表示为图 1-2。

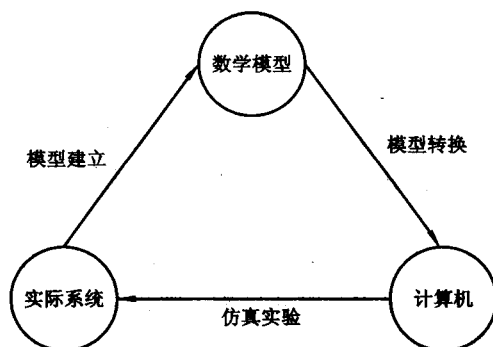


图 1-2 系统仿真三要素的对应关系

系统仿真的三个基本活动如下：

- (1) 模型建立：将实际系统抽象为数学模型，此过程也称为系统辨识。
- (2) 模型转换：通过一些仿真算法将系统的数学模型转换为仿真模型，以便将模型放到计算机上进行处理。
- (3) 仿真实验：通过计算机的运算处理，把实际系统的特点、性能等表示出来，用于指导实际系统。

目前，在仿真过程中比较重视系统建模和仿真结果的分析，这有助于对实际系统性能的讨论和改善。

1.3 系统仿真的类别与实现

1.3.1 系统仿真的分类

系统仿真的类别按照不同的分类方法有不同的分类结果。

1. 按仿真模型的种类分类

1) 物理仿真

按照实际系统的物理性质构造系统的物理模型，并在物理模型上进行实验研究，称之为物理仿真。

物理仿真的出发点是依据相似原理，把实际系统按比例放大或缩小，仿制一个与实际系统工作原理相同、质地相同但是体积小得多的物理模型进行实验研究。该物理模型的状态变量与原系统完全相同。

物理仿真多用于土木建筑、水利工程、船舶、飞机制造等方面。例如，在船舶制造中，工程师需要在设计过程中用比实物船舶小得多的模型在水池中进行各种实验，以取得必要

的数据和了解所要设计的船舶的各种性能。又如，飞机在高空中飞行的受力情况，要事先在地面气流场相似的风洞实验室中进行模拟实验，以获得相应的实验数据，其环境构造也是应用了物理模型。此外，像火力发电厂的动态模拟，操纵控制人员的岗前培训等均使用物理仿真。

物理仿真的优点是直观、形象，其缺点是构造相应系统的物理模型投资较大，周期较长，不经济。另外，一旦系统成型后，难以根据需要修改系统的结构，仿真实验环境受到一定的限制。

2) 数学仿真

按照实际系统的数学关系构造系统的数学模型，并在计算机上进行实验研究，称之为数学仿真。数学仿真是应用性能相似原理，构造系统的数学模型在计算机上进行实验研究的过程。

数学仿真的模型采用数学表达式来描述系统性能，若模型中的变量不含时间关系，则称为静态模型；若模型中的变量包含有时间因素，则称为动态模型。数学模型是系统仿真的基础，也是系统仿真中首先要解决的问题。由于采用计算机作为实验工具，通常也将数学仿真称为计算机仿真或数字仿真。

数学仿真具有经济、方便、使用灵活、修改模型参数容易等特点，已经得到越来越多的应用。其缺点是受不同的计算机软、硬件档次限制，在计算容量、仿真速度和精度等方面存在不同的差别。

3) 数学—物理仿真

将系统的物理模型和数学模型以及部分实物有机地组合在一起进行实验研究，称之为数学—物理仿真，也称为半实物仿真。

这种方法结合了物理仿真和数学仿真各自的特点，常常被用于特定的场合及环境中。例如汽车发动机实验、家电产品的研制开发、雷达天线的跟踪、火炮射击瞄准系统等都可采用半实物仿真。

2. 按仿真模型与实际系统的时间关系分类

1) 实时仿真

仿真模型时钟 τ 与实际系统时钟 t 的比例关系为 $\frac{\tau}{t} = 1$ ，是同步的，可实时地反映出实际系统的运行状态。如炮弹弹头的飞行曲线仿真、火力发电站的实时控制模拟仿真等。

2) 超实时仿真

仿真模型时钟 τ 与实际系统时钟 t 的比例关系为 $\frac{\tau}{t} < 1$ ，即仿真模型时钟要超前于实际系统时钟。如市场销售预测、人口增长预测、天气预报分析等。

3) 慢实时仿真

仿真模型时钟 τ 与实际系统时钟 t 的比例关系为 $\frac{\tau}{t} > 1$ ，即仿真模型时钟滞后于实际系统时钟。如原子核裂变过程的模拟仿真等。

3. 按系统随时间变化的状态分类

1) 连续系统仿真

系统的输入、输出信号均为时间的连续函数，可用一组数学表达式来描述，例如微分

方程、状态方程等。在某些使用巡回检测装置在特定时刻对信号进行测量的场合，得到的信号可以是间断的脉冲或数据信号。此类系统可采用差分方程来描述，由于其被控量是连续变化的，因此也将其归类于连续系统。

2) 离散事件系统仿真

系统的状态变化只在离散时刻发生，且是由某种随机事件驱动的，称之为离散事件系统。例如通信系统、交通控制系统、库存管理系统、飞机订票系统、单服务台排队系统等。此类系统规模庞大，结构复杂，一般很难用数学模型描述，多采用流程图或网络图表达。在分析上则采用概率及数理统计理论、随机过程理论来处理，其结果送到计算机上进行仿真。

1.3.2 控制系统仿真的过程

控制系统的计算机仿真就是以控制系统的数学模型为基础，采用数学模型代替实际的系统，以计算机为主要工具，对控制系统进行实验和研究的一种方法。通常，采用计算机来实现控制系统仿真的过程主要有以下几个方面。

1. 建立控制系统的数学模型

系统的数学模型是描述系统输入、输出变量以及内部各变量之间关系的数学表达式。描述控制系统各变量间静态关系采用的是静态模型，描述控制系统各变量间动态关系采用的是动态模型。最常用的基本数学模型是微分方程与差分方程。

通常，根据系统的实际结构与系统各变量之间所遵循的物理、化学基本定律（例如牛顿运动定律、基尔霍夫定律、动力学定律、焦耳—楞次定律等）来列写变量间的数学表达式以建立系统的数学模型，这就是所谓的用解析法来建立数学模型。

对于大多数复杂的控制系统，则必须通过实验的方法，利用系统辨识技术，考虑计算所要求的精度，略去一些次要因素，使模型既能准确地反映系统的动态本质，又能简化分析计算的工作，这就是所谓的用实验法建立数学模型。

控制系统的数学模型是系统仿真的主要依据。

2. 建立控制系统的仿真模型

原始控制系统的数学模型，如微分方程、差分方程等，还不能用来直接对系统进行仿真，应该将其转换为能够在计算机中对系统进行仿真的模型。

对于连续系统而言，将微分方程这样的原始数学模型，在零初始条件下进行拉普拉斯变换，求得控制系统的传递函数，以传递函数模型为基础，将其等效变换为状态中间模型，或者将其图形化为动态结构图模型，这些模型都是系统的仿真模型。对于离散系统而言，将差分方程经 \mathcal{Z} 变换转换为计算机可以处理的数字控制器模型即可。

3. 编制控制系统的仿真程序

对于非实时系统的仿真，可以用一般的高级语言，例如 BASIC、FORTRAN 或 C 语言等编制系统的仿真程序；对于快速、实时系统的仿真，往往采用汇编语言编制仿真程序。当然，也可以直接利用专门的仿真语言和仿真软件包。

目前，采用 MATLAB 仿真也比较普遍。利用 MATLAB 的 TOOLBOX 工具箱及其 Simulink 仿真集成环境作仿真工具，来研究和分析控制系统是非常方便的。

1.3.3 控制系统仿真的特点

1. 研究方法简单、方便、灵活、多样

控制系统的仿真研究一般是在仿真器上进行的,不管是采用模拟仿真器还是数字仿真工具,与实际物理系统相比都简单多了。仿真研究可以在实验室进行,因此是很方便的。在仿真器上可以任意作参数调整,体现了仿真研究的灵活性,由于仿真器的仿真仅仅代表了物理系统的动力学特性,因此可以模拟各种物理系统,这体现了所研究物理系统的多样性。

2. 实验研究的低成本

由于仿真往往是在计算机上模拟现实系统过程,并可多次重复进行,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实验统计,采用仿真实验可减少实弹发射实验次数约43%,节省费用达数亿美元。采用模拟装置培训工作人员,经济效益和社会效益也十分突出。

此外,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,固然是出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仿真实验的主要原因。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,从而可以对制定控制方案和控制决策提供定量依据。

3. 实验结果充分

通过仿真研究可以得到有关系统设计的大量的、充分的曲线与数据,这一特点也是借助于前面两个特点而得到的。

当然,控制系统的仿真研究也有它的不足,也就是要绝对依赖于控制系统的数学模型,如果数学模型的描述不够准确或者不够完全,控制系统的仿真结果就会出现误差或者错误。这在控制系统的设计中一般通过两种方法克服:一是谨慎地构造数学模型,也就是说,即使不够准确的构造数学模型也比不够全面的数学模型要好;二是在系统设计的最后阶段——系统调试阶段,最后确定仿真结果的正确性。

当前,由于计算机技术与网络技术的高速发展,仿真技术的研究成果已经远远超出动力学系统的仿真,虚拟现实技术就是一例。

1.4 仿真技术的发展与应用

1.4.1 系统仿真的发展

系统仿真技术的发展是与控制工程、系统工程及计算技术的发展密切联系的。1958年第一台混合计算机系统用于洲际导弹的仿真。1964年生产出第一台商用混合计算机系统。20世纪60年代,阿波罗登月计划的成功及核电站的广泛使用进一步促进了仿真技术的发展。20世纪70年代,系统工程被应用于社会、经济、生态、管理等非工程系统的研究,开拓了系统动力学及离散事件系统仿真技术的广阔应用前景。仿真技术在每个阶段有一个比

较热门的应用领域，比如 20 世纪 50 年代热门的应用领域是武器系统及航空，60 年代是航空与航天，70 年代是核能、电力与石油化工，80 年代则是制造系统。仿真技术现在已成为系统分析、研究、设计及人员训练不可缺少的重要手段，它给工程界及企业界带来了巨大的社会效益与经济效益。使用仿真技术可以降低系统的研制成本，提高系统实验、调试及训练过程中的安全性，对于社会和经济系统，由于不可能直接进行实验，仿真技术更显出它的重要性。

最近几年，我国在仿真技术上的发展也是十分突出的。我国已自行研制成银河仿真计算机、训练起落的飞行模拟器、20 万千瓦电站训练仿真器、大型海战仿真器等仿真系统。许多工业部门都已建成或正在建成仿真研究中心，并研制出不少仿真软件及应用成果。

表 1.1 给出了建模与仿真的历史发展概况。

表 1.1 建模与仿真的历史发展

年代	发展的主要特点
20 世纪 40 年代前	在物理科学基础上的建模
20 世纪 40 年代	电子计算机的出现
20 世纪 50 年代中期	仿真应用于航空领域
20 世纪 60 年代	工业控制过程的仿真
20 世纪 70 年代	包括经济、社会和环境因素的大系统仿真
20 世纪 70 年代中期	系统与仿真的结合，如用于随机网络建模的 SLAM 仿真系统
20 世纪 70 年代后期	仿真系统与更高级的决策结合，如决策支持系统 DSS
20 世纪 80 年代中期	集成化建模与仿真环境，如美国 Pritaker 公司的 TESS 建模仿真系统
20 世纪 90 年代	可视化建模与仿真，虚拟现实仿真，分布交互仿真

1.4.2 基于 MATLAB 的控制系统仿真的现状

MATLAB 是一种面向科学与工程计算的高级语言，它提供了丰富的矩阵处理功能，使用极其方便，因而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。

MATLAB 可以在各种类型的计算机上运行，如 PC 及兼容机、Macintosh 及 Sun 工作站、VAX 机、Apollo 工作站、HP 工作站等。使用 MATLAB 语言进行编程，可以不做任何修改就可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，并且，许多使用者还结合自己的研究领域及特长，开发出了各种不同类型的工具箱，如系统辨识工具箱、鲁棒控制工具箱、神经网络工具箱、最优化工具箱、模糊控制工具箱等，随着控制理论的不断发展和研究的不断深入，这类工具箱的数目还会不断增加和完善。MATLAB 的 Simulink 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 对控制系统进行仿真后，还可以利用 MATLAB 的工具在线生成 C 语言代码，用于实时控制。因此，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，以及一般目的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。MATLAB 目前已成为国际控制界最流行的仿真语言，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主要大学、公司和政府研究部门，其应用也已遍及现代科学和技术的各个方面。

1.4.3 仿真技术发展的主要方向

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，衍生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：

(1) 改造建模环境。

(2) 动画。反映在辅助建模、显示仿真结果、系统的活动及其特征中。

(3) 实现仿真结果分析到建模的自动反馈。

(4) 基于虚拟技术在仿真中的应用等。

练 习 题

1. 什么是系统？系统的特性是什么？
2. 什么是系统仿真？
3. 系统仿真的三要素是什么？
4. 系统仿真的类型有哪些？
5. 什么是系统模型？什么是数学模型和物理模型？
6. 系统仿真的主要过程有哪些？

第2章 MATLAB基础及其使用初步

MATLAB, 即“矩阵实验室”, 它是以矩阵为基本运算单元的。本书从最基本的运算单元出发, 介绍 MATLAB 的命令及其用法。

2.1 MATLAB简介

2.1.1 MATLAB的发展历程和影响力

MATLAB 即 Matrix Laboratory(矩阵实验室), 它是由 MATrix 和 LABoratory 两词的前三个字母组合而成的, MATLAB 是一个功能十分强大的工程计算及数值分析软件。

20 世纪 70 年代末期, 在线性代数领域颇有名望的 Cleve Moler 博士利用 FORTRAN 语言、基于特征值计算的软件包 EISPACK 和线性代数软件包 LINPACK, 开发了集命令、解释、科学计算于一体的交互式软件 MATLAB, 形成了萌芽状态的 MATLAB。

1983 年, 工程师 John Little 加入到开发团队, 与 Cleve Moler、Stev Bangert 合作用 C 语言开发了第二代 MATLAB 专业版, 增加了数据可视化功能。

1984 年 MathWorks 公司成立, MATLAB 被推向市场, 经过多年发展, 在数值性软件市场占据了主导地位, 已经发展成为多学科多种工作平台的功能强大的工程计算及数值分析软件, 被誉为“巨人肩上的工具”。

到 20 世纪 90 年代初期, 在国际上 30 多个数学类科技应用软件中, MATLAB 在数值计算方面独占鳌头, 而 Mathematica 和 Maple 则分居符号计算软件的前两名。Mathcad 因其提供计算、图形、文字处理的统一环境而深受中学生欢迎。

在欧美大学里, 诸如应用代数、数理统计、自动控制、数字信号处理、模拟与数字通信、时间序列分析、动态系统仿真等课程的教科书都把 MATLAB 作为必选内容。这几乎成了 20 世纪 90 年代教科书与旧版书籍的重要区别。MATLAB 是攻读学位的本科生、硕士生、博士生必须掌握的基本工具。

在国际学术界, MATLAB 已经被确认为准确、可靠的科学计算标准软件。在许多国际一流学术刊物上(尤其是信息科学刊物), 都可以看到 MATLAB 的应用。在设计研究单位和工业部门, MATLAB 被认做进行高效研究、开发的首选软件工具。如美国 National Instruments 公司的信号测量、分析软件 Labview, Cadence 公司的信号和通信分析设计软件 SPW 等, 或者直接建筑在 MATLAB 之上, 或者以 MATLAB 为主要支撑。又如 HP 公司的 VXI 硬件, TM 公司的 DSP, Gage 公司的各种硬卡、仪器等都接受 MATLAB 的支持。

2.1.2 MATLAB的主要特点

MATLAB 的主要功能是用于矩阵运算, 它具有丰富的矩阵运算函数, 能够在求解诸