

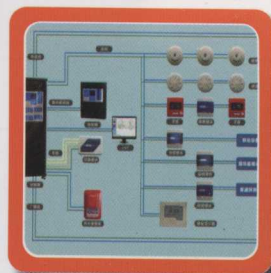
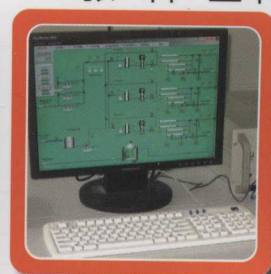


全国高等院校仪器仪表及自动化类“十二五”规划教材

控制系统原理 与MATLAB仿真实现

◎ 王 敏 主编

◎ 张 科 主审



先解释与自动控制有关的基本概念，后介绍 MATLAB 相关函数
详述 MATLAB/Simulink 的功能、操作及其在自动控制中的应用
提供大量经过实验验证的经典控制理论和现代理论的系统仿真



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

全国高等院校仪器仪表及自动化类“十二五”规划教材

控制系统原理与 MATLAB 仿真实现

王 敏 主 编

朱 冰 副主编

张 科 主 审

浙江工业大学
图书馆藏书



浙江工业大学图书馆



7 2 0 1 4 1 2 6

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书以 MATLAB/Simulink 在自动控制中的应用为宗旨, 结合日常的教学和科研工作进行编写。全书分为 9 章, 包括两部分内容: MATLAB 用于控制系统计算及仿真的知识、经典控制理论和现代控制理论的系统仿真。每章先简要介绍有关的基本概念, 然后介绍 MATLAB 相关函数, 并从实用的角度出发, 通过大量典型示例, 对 MATLAB/Simulink 的功能、操作及其在自动控制中的应用进行详细论述, 大部分内容和例题已在教学实践中做过实验和验证。

本书可作为高等院校自动化和电气信息等专业的教材。本书具有较强的通用性和实用性, 故也可作为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

控制系统原理与 MATLAB 仿真实现/王敏主编. —北京: 电子工业出版社, 2014.1

全国高等院校仪器仪表及自动化类“十二五”规划教材

ISBN 978-7-121-21774-6

I. ①控… II. ①王… III. ①自动控制系统—计算机辅助设计—Matlab 软件—高等学校—教材
IV. ①TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 258744 号

策划编辑: 郭穗娟

责任编辑: 万子芬

印 刷: 三河市双峰印刷装订有限公司

装 订: 三河市双峰印刷装订有限公司

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: 787×1 092 1/16 印张: 16 字数: 410 千字

印 次: 2014 年 1 月第 1 次印刷

印 数: 3500 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 zltz@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

《全国高等院校仪器仪表及自动化类“十二五”规划教材》

编委会

主任委员：许贤泽

副主任委员：谭跃刚

刘波峰 郝晓剑 杨述斌 付 华

委 员：赵 燕 黄安怡 郭斯羽 武洪涛

靳 鸿 陶晓杰 戴 蓉 李建勇

秦 斌 王 欣 黎水平 孙士平

冯先成 白福忠 张国强 王后能

张雪飞 谭保华 周 晓 王 敏

前 言

自动控制领域里有大量烦琐的计算和仿真曲线绘制任务，在计算机高速发展的今天，利用计算机可以完成这一任务，即进行控制系统的仿真试验和研究，并进一步实现计算机控制。控制系统仿真是近 20 多年发展起来的一门新兴技术学科，是对控制系统进行分析、设计和综合研究的一种很有效的手段。

由于 MATLAB 软件包含各种功能的工具箱，具有强大的运算功能，特别是 MATLAB/Simulink 控制工具箱，内容丰富、门类齐全，覆盖了控制系统的各个领域，所以在控制系统仿真中得到广泛应用。

本书以先进计算机仿真软件 MATLAB/Simulink 在自动控制中的应用为编写宗旨，借鉴以往类似书籍的经验，并结合日常的教学和科研工作编写。内容包括两大部分：第一部分，介绍 MATLAB 用于控制系统计算及仿真的有关知识；第二部分，内容涵盖经典控制理论和现代控制理论的系统仿真。

每章先对与自动控制有关的基本概念进行简要介绍，然后介绍 MATLAB 相关函数，并从实用的角度出发，通过大量典型示例，对 MATLAB/Simulink 的功能、操作及其在自动控制中的应用进行详细论述。大部分内容和例题已在本科生有关控制理论与控制工程的教学实践中做过实验和验证。

全书共 9 章，包括系统仿真的基本概念、MATLAB/Simulink 的基本内容及使用方法、控制系统的数学模型及其转换、控制系统根轨迹、时域和频域的分析与校正、控制系统状态空间的分析与设计和控制系统的联合仿真。

本书第 1、8 章和附录 A 由西北工业大学明德学院王敏编写，第 2、5 章由西安石油大学朱冰编写，第 3、9 章和附录 B 由武汉工程大学王利恒编写，第 4 章由王敏和西北工业大学明德学院张国强编写，第 6 章由张国强编写，第 7 章由太原科技大学姚峰林编写，全书由王敏统稿。西北工业大学张科教授在百忙中审阅了全书，提出了许多宝贵的修改意见，西北工业大学李言俊教授对本书进行了推荐，西北工业大学余瑞星教授对本书编写给予了大力支持和指导，在此表示衷心感谢！

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的教材。本书具有较强的通用性和实用性，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书。

尽管我们为本书付出了心血和努力，但书中仍存在不足与疏漏之处，恳请广大读者批评指正。

编 者

2013 年 8 月

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 控制系统的研究方法	1
1.1.1 控制理论的发展	1
1.1.2 经典控制理论	2
1.1.3 现代控制理论	2
1.2 控制系统仿真的基本概念	2
1.2.1 控制系统的实验方法	2
1.2.2 模型的建立及分类	3
1.2.3 仿真实验的分类	3
1.2.4 数字仿真	4
1.3 控制系统仿真软件及过程	5
1.3.1 仿真软件	5
1.3.2 MATLAB 仿真的优越性	6
1.3.3 仿真过程	6
1.4 仿真技术的应用及发展	7
1.4.1 仿真技术在工程中的应用	7
1.4.2 应用仿真技术的意义	8
1.4.3 仿真技术的发展趋势	8
小结	9
习题	9
第 2 章 MATLAB 基础知识	10
2.1 MATLAB 数据结构	10
2.1.1 数值型和逻辑型数据	10
2.1.2 字符和字符串型数据	12
2.1.3 结构体型数据	13
2.2 MATLAB 基本控制流程	13
2.2.1 顺序结构	14
2.2.2 选择结构	14
2.2.3 循环结构	16
2.2.4 分支语句与其他流程控制语句	18
2.3 MATLAB 的 M 函数设计	19
2.3.1 M 函数的基本结构	20
2.3.2 M 脚本式文件与 M 函数式文件的区别	23
2.3.3 M 函数中的变量类型	23
2.3.4 M 函数的跟踪调试	24
2.4 MATLAB 的图形绘制	26
2.4.1 绘制二维图形	27
2.4.2 绘制三维图形	30
2.5 MATLAB 的图形用户界面设计	34
小结	40
习题	40



第3章 Simulink 交互式仿真集成环境	41
3.1 Simulink 仿真概述	41
3.1.1 初识 Simulink	41
3.1.2 在 Simulink 下工作	43
3.1.3 Simulink 工作原理	45
3.2 Simulink 模块及处理	46
3.2.1 Simulink 模块库	46
3.2.2 Simulink 模块处理	47
3.3 Simulink 仿真设置	48
3.3.1 求解器设置面板	49
3.3.2 数据导入/导出面板	51
3.3.3 优化面板	52
3.3.4 诊断面板	52
3.4 子系统与模块封装技术	54
3.4.1 模型子系统	55
3.4.2 模块封装技术	56
3.4.3 自定义模型库	59
3.5 S-函数设计与应用	60
3.5.1 用 m 语言编写 S-函数	61
3.5.2 用 C 语言编写 S-函数	63
小结	66
习题	66
第4章 控制系统的数学模型	68
4.1 几种常用数学模型	68
4.1.1 传递函数模型	68
4.1.2 零极点增益模型	68
4.1.3 部分分式模型	69
4.1.4 状态空间模型	69
4.1.5 MATLAB/Simulink 在数学模型建立中的应用	69
4.2 数学模型的相互转换	75
4.2.1 由传递函数求状态空间表达式	75
4.2.2 由状态空间表达式求传递函数	75
4.2.3 MATLAB/Simulink 在数学模型转换中的应用	76
4.3 数学模型的连接	84
4.3.1 串联连接	85
4.3.2 并联连接	85
4.3.3 反馈连接	85
4.3.4 MATLAB/Simulink 在数学模型连接中的应用	85
小结	91
习题	91
第5章 控制系统的时域分析	92
5.1 系统的稳定性分析	92
5.2 时域响应分析	94
5.2.1 系统的动态过程与稳态过程	94
5.2.2 时域内系统的主要性能指标	94
5.2.3 系统的时域响应分析	95
5.3 MATLAB/Simulink 在时域分析中的应用	97



5.3.1	MATLAB/Simulink 在控制系统建模中的应用	98
5.3.2	基于 MATLAB 的稳定性判断方法	103
5.3.3	MATLAB/Simulink 在系统动态特性分析中的应用	107
5.3.4	MATLAB/Simulink 在求取系统稳态误差中的应用	115
5.4	LTI Viewer 在时域分析中的应用	118
5.4.1	LTI Viewer 命令栏主要命令介绍	119
5.4.2	LTI Viewer 的应用实例	121
	小结	124
	习题	124
第 6 章	控制系统的根轨迹分析	126
6.1	根轨迹法基本概念	126
6.1.1	根轨迹方程	126
6.1.2	绘制根轨迹的基本法则	127
6.2	其他形式的根轨迹	128
6.2.1	参数根轨迹	128
6.2.2	零度根轨迹	128
6.3	MATLAB/Simulink 在根轨迹分析中的应用	129
6.3.1	绘制根轨迹的函数	129
6.3.2	计算根轨迹增益函数	130
6.3.3	绘制含阻尼系数和自然频率栅格线的系统根轨迹	131
6.4	根轨迹分析与设计工具 rltool	132
6.4.1	rltool 根轨迹设计窗口界面简介	133
6.4.2	命令菜单简介	133
	小结	138
	习题	138
第 7 章	控制系统的频域分析与校正	140
7.1	频率特性基本概念	140
7.1.1	系统的表示	140
7.1.2	频率特性定义	141
7.1.3	矢量表示	142
7.2	频率特性的表示方法	142
7.2.1	极坐标频率特性曲线	143
7.2.2	对数频率特性曲线	143
7.2.3	对数幅相特性曲线	144
7.3	频率分析法	144
7.3.1	开环极点与闭环极点的关系	144
7.3.2	频域稳定性判据	145
7.4	频率法稳定性分析	149
7.4.1	最小相位系统	149
7.4.2	原点处有开环极点的情况	149
7.4.3	非最小相位系统	151
7.5	MATLAB/Simulink 在频域分析中的应用	152
7.5.1	频域分析的基本原理	152
7.5.2	MATLAB 进行频域分析的方法	152
7.5.3	实例分析	154
7.6	MATLAB/Simulink 在频域校正中的应用	156
7.6.1	相位超前校正	156



7.6.2	相位滞后校正	163
7.6.3	滞后-超前校正	168
7.6.4	串联 PID 校正	173
	小结	181
	习题	181
第 8 章	控制系统状态空间分析与设计	183
8.1	线性系统状态空间基础	183
8.1.1	状态空间的基本概念	183
8.1.2	状态空间表达式的标准形式	185
8.1.3	MATLAB/Simulink 在状态空间表达式中的应用	186
8.2	状态空间表达式的解	188
8.2.1	连续系统状态方程的解	188
8.2.2	线性定常连续系统状态空间表达式的离散化	189
8.2.3	离散系统状态方程的解	190
8.2.4	MATLAB/Simulink 在状态空间表达式求解中的应用	191
8.3	线性系统的状态能控性与能观性	192
8.3.1	线性定常连续系统状态能控性	192
8.3.2	线性定常连续系统状态能观性	193
8.3.3	离散系统状态能控性、能观性	195
8.3.4	MATLAB/Simulink 在系统能控性、能观性分析中的应用	195
8.4	线性系统稳定性分析	200
8.4.1	概述	200
8.4.2	李雅普诺夫稳定性定理	200
8.4.3	李雅普诺夫稳定性分析	202
8.4.4	MATLAB/Simulink 在线性系统稳定性分析中的应用	203
8.5	线性系统状态空间设计	207
8.5.1	线性反馈控制系统的基本结构	208
8.5.2	极点配置	209
8.5.3	状态观测器	210
8.5.4	MATLAB/Simulink 在状态空间分析和设计中的应用	212
	小结	217
	习题	218
第 9 章	控制系统的联合仿真	219
9.1	基于 S-函数的仿真扩展	219
9.1.1	硬件在回路的仿真扩展	219
9.1.2	网络分布式仿真的扩展	220
9.2	基于虚拟样机的联合仿真	222
9.2.1	虚拟样机技术	222
9.2.2	联合仿真的步骤	223
9.2.3	球棒系统的联合仿真	224
	小结	229
	习题	230
附录 A		231
附录 B		235
参考文献		248

第 1 章 概 述

控制系统仿真是对控制系统进行分析、设计和综合研究的一种很有效的手段,是近 20 多年来发展起来的一门新兴技术学科。在计算机高度发展的今天,研究和设计的控制系统日益复杂化,控制任务日益多样化,而控制要求也越来越高,利用计算机进行仿真试验和研究,并进一步实现计算机控制就成为从事控制及相关行业的工程技术人员所必须掌握的一门技术。本章介绍控制系统的研究方法、系统仿真的模型、分类、应用范围、发展方向和控制系统仿真的基本步骤及应用软件。

1.1 控制系统的研究方法

1.1.1 控制理论的发展

进入 20 世纪以来,现代科学技术的发展对自动控制的精度、速度和适应能力的要求越来越高,从而推动了自动控制理论和控制技术的迅速发展。从发展的不同阶段来看,控制理论的发展大致经历了经典控制理论和现代控制理论两个阶段。

经典控制理论最初称为自动调节原理,适用于较简单系统特定变量的调节。随着现代控制理论的出现,改称为经典控制理论。经典控制理论主要研究简单的单输入、单输出(SISO)系统,其设计原则是保证静态准确度和防止不稳定,而瞬态响应的平滑性及响应的快慢是次要的。控制系统设计的常用方法包括频域法、根轨迹法、奈奎斯特稳定判据、期望对数频率特性综合等。这些方法在精确度、准确度不高的情况下是完全适用的。经典控制涉及的大多是线性时不变(LTI)系统,非线性系统中的相平面法只包含两个变量,对于干扰也只是按线性叠加处理。经典控制理论是与生产过程的局部自动化相适应的,它具有明显的依靠手工进行分析和综合的特点,这个特点是和 20 世纪 40~50 年代生产发展的状况及计算机技术的发展水平尚处于初期阶段密切相关的。

现代控制理论主要用来解决多输入、多输出(MIMO)的问题,系统可以是线性或非线性的、定常或时变的。例如,对加工机械有了更高的要求,反映在磨床上,只靠恒速或恒转速,即使加上砂轮自动补偿也是不够的。因为磨床在磨削过程中,砂轮质量是不断变化的,砂轮的半径越来越小,切线速度在变动中,如果保持恒转速,磨削效率就会越来越低。为了提高效率,可以使转速提高,但在恒功率条件下,这样做的结果必然导致转速减小,因此,需要调速。但这种调速与通常的调速不同,而且由于考虑了另一个变量(砂轮),所以系统已是一个时变系统。显然,其他加工机械都有类似的情况,在较精密的加工机械使用中,有的控制变量达多个,而经典法显然对此无能为力。因此,在航天飞行器、导弹、火炮的控制方面需要现代控制理论,而且随着工业生产对产品质量和产品要求的提高,现代控制理论也日渐为人们所关注。



1.1.2 经典控制理论

经典控制理论对 SISO LTI 系统的分析和综合是有成效的,它主要以 Laplace 变换和 Z 变换为数学工具,用传递函数方法描述系统的动态特性,用频域响应、根轨迹分析和极点配置等理论研究设计控制系统。

经典控制理论主要有以下特点:

(1) 经典控制理论本质上是一种频域方法,它以系统的输入、输出特性作为研究的依据,着眼于系统的输出;而现代控制理论本质上是一种时域方法,它建立在状态变量描述方法的基础上。

(2) 经典控制理论是在一类特定的输入情况下分析输出的响应。在综合问题上,是根据给定的某种指标来设计系统校正网络的。

(3) 经典控制理论的控制器即校正装置,是由能实现典型控制规律的调节器构成的,而现代控制理论的控制器则是能实现任意控制规律的数字机。

(4) 经典控制理论的基本内容有时域法、频域法、根轨迹法、描述函数法、相平面图、代数与几何判据、校正网络设计等,研究的主要问题是稳定性问题。

1.1.3 现代控制理论

现代控制理论以线性代数数学工具,用状态空间方法描述系统内部的动力学性能,研究系统的稳定性、能控性、能观性等问题,用极点配置、最优控制、状态反馈等理论研究设计控制系统。现代控制理论是在经典控制理论的基础上发展起来的,它主要有以下特点:

(1) 现代控制理论是以多变量、线性及非线性系统为研究对象。在近代的工业过程控制、飞行器控制等许多领域中,被控对象变得日益复杂,其中包括了多变量耦合问题、参数时变问题和非线性问题。现代控制理论正是为了处理这样的复杂控制系统而发展起来的。

(2) 现代控制理论以时域中的状态空间方法对系统进行数学描述,并在此基础上对系统进行各种定性和定量的分析以及希望的控制规律设计。

(3) 现代控制理论以现代数学方法为主要分析手段,如线性代数、微分方程和微分几何等现代数学理论在最优控制、非线性系统的控制问题中都有广泛的应用,甚至像模糊数学、混沌及神经网络等最新的数学方法也已经在许多控制领域得到应用。

(4) 现代控制技术的研究是以计算机为主要计算和分析工具的,计算机技术的发展极大地促进了控制理论研究的广泛应用与推广。

(5) 现代控制技术的研究对象还包括没有或不能用精确数学模型进行描述的广泛意义上的非线性系统,其中诸如神经网络控制、自适应控制等先进控制技术已成功应用到卫星、航天等大系统的控制中。现代控制技术能够处理复杂非线性、相互耦合、外界干扰、多输入多输出、参数时变等复杂对象,研究的范围与经典控制理论相比有了极大的扩展。

1.2 控制系统仿真的基本概念

1.2.1 控制系统的实验方法

在工程设计与理论学习过程中,我们会接触到许多控制系统的分析、综合与设计问题,



需要对相应的系统进行实验研究,概括起来有解析法、实验法和仿真实验法三种试验方法。

1) 解析法

解析法是指运用已掌握的理论知识对控制系统进行理论分析和计算的方法,是一种纯理论意义上的实验分析方法,在对系统的认识过程中具有普遍意义。但是,在许多工程实际问题中,由于受到理论的不完善性以及事物认识的不全面性等因素的影响,解析法往往有很大的局限性。

2) 实验法

实验法是指对于已经建立的实际系统,利用各种仪器仪表及装置,对系统施加一定类型的信号,通过测量系统响应来确定系统性能的方法。它具有简明、直观和真实的特点,在一般的系统分析和测试中经常采用。

由于以下几方面的原因,这种实验方法在实际中常常难以实现。

(1) 对于控制系统的设计问题。由于实际系统还没有真正建立起来,所以不可能在实际的系统上进行实验研究。

(2) 实际系统上不允许进行实验研究。如化工控制系统,随意改变系统运行的参数,往往会导致最终成品的报废,造成巨额损失。

(3) 费用过高,具有危险性,周期较长。如大型加热炉、飞行器及原子能利用等问题的实验研究。

鉴于此,在模型上进行的仿真实验研究方法逐渐成为对控制系统进行分析、设计和研究的十分有效的方法。

3) 仿真实验法

仿真实验法就是在模型上(物理的或数学的)所进行的系统性能分析与研究的实验方法,它所遵循的基本原则是相似原理,即几何相似、环境相似与性能相似。

1.2.2 模型的建立及分类

模型是对所要研究的系统在某些特定方面的抽象,是人们认识事物的一种手段。模型可以分为以下两类。

(1) 物理模型:应用几何相似原理,仿制一个与实际系统工作原理相同、质地完全相同但是体积小得多的模型。例如,在飞行器的研制中,将其放置在“风洞”之中进行的实验研究,就是模拟空中情况的物理模型的仿真实验研究。在船舶设计制造中,常常按一定的比例尺寸缩小建造一个船舶模型,然后将其放置在水池中进行各种动态性能的实验研究。

(2) 数学模型:是从一定的功能或结构上进行相似,用数学的方法来再现原型的功能或结构特征。数学模型可分为机理模型、统计模型与混合模型。

1.2.3 仿真实验的分类

仿真实验可以按模型和计算机类型进行分类。

1) 按模型分类

(1) 物理仿真:应用物理模型进行实验研究。具有效果逼真、精度高、实时、在线等优点,但造价高或耗时长,大多在一些特殊场合下采用(如导弹、卫星一类飞行器的动态仿真,发电站综合调度仿真与培训系统等)。

(2) 数学仿真:应用性能相似原理构成数学模型,在计算机上进行实验研究,具有非



实时、离线、经济、快速、实用的特点。

2) 按计算机类型分类

(1) 模拟仿真: 这是一种早期的仿真手段, 采用数学模型在模拟计算机上进行的仿真实验, 现在基本被淘汰。

它的特点是描述连续物理系统的动态过程比较自然、逼真, 具有仿真速度快、失真小、结果可靠的优点, 但受元器件性能影响, 仿真精度较低, 对计算机控制系统(采样控制系统)的仿真较困难, 仿真实验过程的自动化程度较低。

(2) 数字仿真: 它是 20 世纪 60 年代随着计算机的发展而发展起来的一种仿真手段, 应用数学模型, 在数字计算机上借助数值计算方法进行的仿真实验, 它的计算与仿真精度较高。

理论上计算机的字长可以根据精度要求来“随意”设计, 因此其仿真精度可以是无限的, 但是由于受到误差积累、仿真时间等因素影响, 其精度也不宜定得太高。仿真实验的自动化程度较高, 可方便地实现显示、打印等功能, 但计算速度比较低, 在一定程度上影响到仿真结果的可信度。随着计算机技术的发展, 速度问题会在不同程度上有所改进与提高。数字仿真没有专用的仿真软件支持, 需要设计人员用高级程序语言编写求解系统模型及结果输出程序。

(3) 混合仿真: 它结合了模拟仿真与数字仿真的技术与特点, 其缺点是系统构成复杂, 造价偏高。主要应用于: 要求对控制系统进行反复迭代计算时, 如参数寻优、统计分析等; 要求与实物连接进行实时仿真, 同时又有一些复杂函数的计算问题; 一些计算机控制系统的仿真问题, 此时, 数字计算机用于模拟系统中的控制器, 模拟计算机用于模拟被控对象。

(4) 全数字仿真: 对于计算机控制系统的仿真问题, 在实际应用中为简化系统构成, 对象的模拟也可以用数字计算机来实现, 用软件来实现对象各种机理的模拟。具有灵活、多变、构成简单的特点。

1.2.4 数字仿真

系统, 是物质世界中相互制约又相互联系的、以期实现某种目的的一个运动整体, 这个整体叫做系统。如果系统用于自动控制, 则称之为自动控制系统。

系统以“时间”为依据, 可以分为四类:

(1) 连续系统。系统中的状态变量随时间连续变化的系统, 如电动机速度控制系统、锅炉温度调节系统。

(2) 离散时间系统。系统中状态变量的变化仅发生在一组离散时刻上的系统, 如计算机系统。

(3) 离散事件系统。系统中状态变量的改变是由离散时刻上所发生的事件所驱动的系统。如大型仓储系统中“库存”问题, 其“库存量”是受“入库”、“出库”事件随机变化影响的。

(4) 连续离散混合系统。若系统中一部分是连续系统, 另一部分是离散系统, 其间有连接环节将两者联系起来的系统, 如计算机控制系统, 通常情况下其对象为连续系统, 控制器为离散时间系统。

控制系统仿真研究的对象是控制系统, 而系统特性的表征主要采用与之相应的系统数学模型, 将其输入计算机进行相应的处理, 就构成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。它们之间的关系如图 1-1 所示, 由图可见, 将实际系统抽象为数学模型, 称为一次模型化, 它还涉及系统辨识技术问题, 统称为建模问题; 将数学模型转换为可在计算机上运行的仿真模型, 称为二次模型化, 这涉及仿真技术问题, 统称为仿真实验。



图 1-1 控制系统仿真三要素及其关系

1.3 控制系统仿真软件及过程

1.3.1 仿真软件

控制系统的许多问题都是通过仿真软件来实现的, 仿真软件是一类面向仿真用途的专用软件, 它的特点是面向问题、面向用户。近 40 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、自动控制、人工智能等技术所取得的新成果, 从而得到了很大的发展。自 1955 年第一个仿真软件问世以来, 按照新技术出现的时间顺序, 可将仿真软件的发展分为以下几个阶段:

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 年间面向框图的 MIDAS, 面向大型连续系统的仿真规范 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 年间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 和 SLAM 等。

4) 一体化建模与仿真环境软件

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。



1.3.2 MATLAB 仿真的优越性

由于 MATLAB 具有以下的特点, 所以特别适合用来对控制系统进行计算与仿真。

首先, MATLAB 运算功能强大, 它提供了向量、数组、矩阵运算、复数运算、求解高次方程、常微分方程的数值积分运算、最优化方法等, 这些都是在控制理论及控制系统里经常遇到的计算问题。MATLAB 就这一点已与自动控制密切联系在一起。

其次, 由于世界上从事自动控制的多个知名专家, 在自己擅长的控制领域里开发了具有特殊功能的 TOOLBOX 工具箱, 使得 MATLAB 从一个数值运算工具变成了自动控制计算与仿真的强有力工具。MATLAB 的控制箱里, 软件内容丰富, 系统门类齐全, 覆盖了控制系统的各个领域, 每一个工具箱都是当今世界上该控制领域里的顶尖的计算与仿真程序软件。

再有, MATLAB 内涵丰富、扩充能力强、编程效率高, 不仅 MATLAB 的开发者可以编制软件程序, 使用者同样可以为实现新功能或特殊功能开发编制软件程序, 并将其放到 MATLAB 里去, 使 MATLAB 的功能不断扩充、逐步完善。

还有, MATLAB 语言语句简单, 极其容易学习与使用。自动控制本身就有很多理论问题、系统实现问题需要研究, 再要学习这种语言及其语法花费太多的时间与精力是不可取的。MATLAB 正好具有语言简单、掌握方便的特点, 是一个理想的工具。

最后, MATLAB 界面友好, 使得从事自动控制的科技工作者乐于接触它, 愿意使用它。MATLAB 的强大方便的图形功能, 可以使得重复、烦琐计算与绘制图形的笨重劳动被简单、轻而易举的计算操作所代替, 而且数据计算准确, 图形绘制精密, 这是过去从事本专业的人所追求与期盼的事情。

随着 MATLAB 软件的出现, 它的 TOOLBOX 工具箱与 Simulink 仿真工具, 为控制系统的计算与仿真提供了一个强有力的工具, 使控制系统的计算与仿真的传统方法发生了革命性的变化。MATLAB 已经成为国际、国内控制领域内最流行的计算与仿真软件。

1.3.3 仿真过程

控制系统的计算机仿真就是以控制系统的模型为基础, 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, 控制系统仿真的过程按以下步骤进行:

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) 建立自控系统的数学模型

系统的数学模型是描述系统输入、输出变量及内部各变量之间关系的数学表达式。描述自控系统诸变量间静态关系的数学表达式, 称为静态模型; 描述自控系统诸变量间动态关系的数学表达式, 称为动态模型。最常用的基本数学模型是微分方程与差分方程。

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, 牛顿定律、克希霍夫定律、运动动力学定律等来列出变量间的数学表达式, 以建立数学模型, 这是解析法建立数学模型。

对于很多复杂的系统, 则必须通过实验方法并利用系统辨识技术, 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。这是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。

3) 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空间模型，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 z 变换转换为计算机可以处理的数字控制器模型即可。

4) 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 语言等编写系统的仿真程序；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 仿真集成环境作为仿真工具来研究和分析控制系统是非常方便的。

5) 在计算机上进行仿真实验并输出仿真结果

首先，将编制好的仿真程序输入到计算机中，并给定仿真的初始参数；然后进行仿真实验并对仿真模型与仿真程序进行相应的检验和修改，再按照系统仿真的要求将得到的系统仿真最终结果通过相应设备以数据、曲线、图形等方式输出；最后，进行仿真总结，提交系统仿真的报告。

1.4 仿真技术的应用及发展

随着计算机技术的发展，计算机仿真越来越多地取代物理仿真。现在所所谓的仿真，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。

1.4.1 仿真技术在工程中的应用

仿真技术有着广泛的应用，而且应用的深度和广度也日益增加，目前主要应用在以下方面：

(1) 航空与航天工业，包括飞行器设计中的三级仿真体系（即纯数学仿真、半实物仿真、实物仿真）或模拟飞行实验，飞行员及宇航员训练用飞行仿真模拟器等。

(2) 电力工业，包括电力系统动态模型实验，电力系统负荷分配、瞬态稳定性及最优潮流控制，电站操作人员培训模拟系统等。

(3) 原子能工业，包括模拟核反应堆，核电站仿真器，用来训练操作人员及研究异常故障的排除处理等。

(4) 石油、化工及冶金工业。

(5) 非工程领域，如医学、社会学、宏观经济和商业策略的研究等。



1.4.2 应用仿真技术的意义

仿真技术的应用具有重要的意义,主要体现在以下方面:

(1) 经济。大型、复杂系统直接实验是十分昂贵的,如空间飞行器一次飞行实验的成本约在1亿美元左右,而采用仿真实验仅需其成本的1/10~1/5,且设备可以重复利用。

(2) 安全。某些系统,如载人飞行器、核电装置等,直接实验往往会有很大的危险,甚至是不允许的,而采用仿真实验可以有效降低危险程度,对系统的研究起到保障作用。

(3) 快捷。提高设计效率,如电路设计、服装设计等。

(4) 具有优化设计和预测的特殊功能。对一些真实系统进行结构和参数的优化设计是非常困难的,这时仿真可以发挥它特殊的优化设计功能。再如在非工程系统,如社会、管理、经济等系统,由于其规模及复杂程度巨大,直接实验几乎是不可能的,这时通过仿真技术与方法的应用可以获得对系统的某种超前认识。

1.4.3 仿真技术的发展趋势

由于仿真理论、方法的提高,仿真实验任务的扩大及相关学科的发展,展望仿真技术今后的发展趋势,主要有以下几个方向:

1) 向广阔的时空发展

以现代复杂军事系统为例,它涉及战略、战术、技术决策系统,指挥、通信、运输系统,外层空间与内层空间、武器和运载系统,地面与空间各军兵种、我军协同作战系统与作战环境等。这种激烈对抗军事系统,对时空一致、任务协同、实时性、实用性等都要求很高,因而在这类复杂仿真系统中有很多复杂、艰巨的技术问题等待解决。

2) 向快速、高效与海量信息通道发展

对大型复杂系统、分布系统、综合系统进行实时仿真,由于信息量庞大,需对信息进行快速和高效的传输、变换及处理。以多微处理机为基础的全数字并行仿真计算机系统将会有更多的发展。

3) 向规范化模型校核、验证、确认技术发展

模型建立了,如果没有规范化模型校核、验证,确认来检验,评价模型的正确性和置信度,仿真的精度和可靠性是无法保证的,目前它已引起仿真界的高度重视。

4) 向虚拟现实技术发展

虚拟现实是将真实环境、模型化物理环境、用户融为一体,为用户提供视觉、听觉、嗅觉和感官触觉以逼真感觉信息的仿真系统,使人感到如同身临其境的仿真环境。

5) 向高水平的一体化、智能化仿真环境发展

开展系统仿真科学研究,开发仿真系统技术,需要一体化、智能化仿真环境这样有效的工具,这方面的差距还较大。由于微型机的大量推广和应用,将会发展适合这类机型的仿真软件。

6) 向广阔的应用领域扩展与其他有关的学科融合

由于仿真的对象越来越广阔和复杂,也就是应用领域越广泛,相关的学科就越多,而且日趋密切。特别是在非工程或混合工程系统中,仿真技术的应用将会迅速增长。