

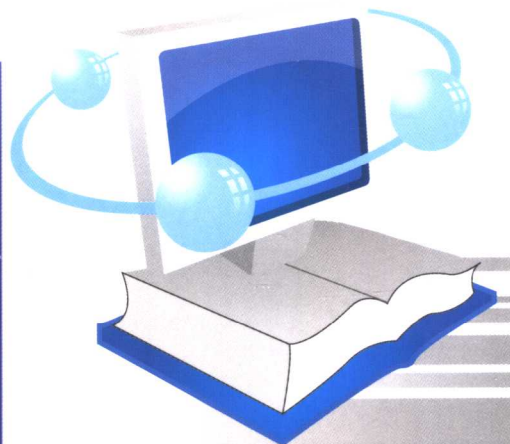


21st CENTURY

十一五规划教材

21世纪全国高等院校

自动化系列 实用规划教材



控制系统仿真

主 编 郑恩让 聂诗良
副主编 罗祖军 张袅娜

中国林业出版社
China Forestry Publishing House



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

TP273
385

21 世纪全国高等院校自动化系列实用规划教材

控制系统仿真

主 编 郑恩让 聂诗良
副主编 罗祖军 张袅娜
参 编 赵立杰 李 虹
孙晓荣

中国林业出版社
China Forestry Publishing House



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

本书是 21 世纪全国高等院校自动化系列实用规划教材之一, 并按照教育部自动化类专业本科教学大纲编写。本书以 MATLAB 语言及其 Simulink 仿真模块为主要工具, 对控制系统建模、仿真、分析与设计进行了较全面的介绍。全书共分为 7 章, 内容包括: 绪论、MATLAB 语言基础、控制系统数学模型及其转换、控制系统数字仿真、控制系统计算机辅助分析、控制系统计算机辅助设计、Simulink 仿真工具。本书在选材上, 力图做到内容全面, 重点突出, 主要讲明基本理论与方法的实际应用。

本书内容深入浅出、图文并茂, 各章之间既相互联系又相对独立, 读者可根据自己需要选择阅读。本书可作为自动控制、机械电子、信息处理、测控技术与仪器、计算机仿真、计算机应用等大专院校本科生和研究生的教学参考书, 也可供相关领域的工程技术和研究人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

控制系统仿真/郑恩让, 聂诗良主编. —北京: 中国林业出版社; 北京大学出版社, 2006.8

(21 世纪全国高等院校自动化系列实用规划教材)

ISBN 7-5038-4410-8

I. 控… II. ①郑… ②聂… III. 自动控制系统—数字仿真 IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 098248 号

书 名: 控制系统仿真

著作责任者: 郑恩让 聂诗良 主编

策划编辑: 李 虎

责任编辑: 李娉婷 曹 岚 张 敏

标准书号: ISBN 7-5038-4410-8

出 版 者: 中国林业出版社(地址: 北京市西城区德内大街刘海胡同 7 号 邮编: 100009)

<http://www.cfph.com.cn> E-mail: cfphz@public.bta.net.cn

电话: 总编室 66180373 营销中心 66187711

北京大学出版社(地址: 北京市海淀区成府路 205 号 邮编: 100871)

<http://www.pup.cn> <http://www.pup6.com> E-mail: pup_6@163.com

电话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667 出版部 62754962

印 刷 者: 涿州市星河印刷有限公司

发 行 者: 北京大学出版社 中国林业出版社

经 销 者: 新华书店

787 毫米×1092 毫米 16 开本 17.75 印张 400 千字

2006 年 8 月第 1 版 2006 年 8 月第 1 次印刷

定 价: 26.00 元

《21 世纪全国高等院校自动化系列实用规划教材》

专家编审委员会

主任委员 张德江

副主任委员 (按姓氏拼音顺序排名)

陈 静 丁坚勇 侯媛彬

纪志成 任庆昌 吴 斌

秘书长 于微波

委 员 (按姓氏拼音顺序排名)

陈志新 戴文进 段晨旭 樊立萍

范立南 公茂法 关根志 嵇启春

蒋 中 雷 霞 刘德辉 刘永信

刘 原 马永翔 孟祥萍 孟彦京

聂诗良 王忠庆 吴旭云 燕庆明

杨新华 尤 文 张桂青 张井岗

总 序

我们所处的时代被称为信息时代。信息科学技术的迅速发展和广泛应用,深深地改变着人类生产、生活的各个方面。人类社会生产力发展和人们生活质量的提高越来越得益于和依赖于信息科学技术的发展。自动化科学技术涉及到信息的检测、分析、处理、控制和应用等各个方面,是信息科学技术领域的重要组成部分。在我国经济建设的进程中,工业化是不可逾越的发展阶段。面对全面建设小康社会的发展目标,党和国家提出走新型工业化道路的战略决策,这是一条我国当代工业化进程的必由之路。实现新型工业化,就是要坚持走科技含量高、经济效益好、资源消耗低、环境污染少、人力资源优势得到充分发挥的可持续发展的科学发展之路。在这个过程中,自动化科学技术起着不可替代的重要作用,高等学校的自动化学科肩负着人才培养和科学研究的光荣的历史使命。

我国高等教育中工科在校大学生数占在校大学生总数的 35%~40%,其中自动化类的学生是工科各专业中学生人数最多的专业之一。在我国高等教育已走进大众化阶段的今天,人才培养模式多样化已成为必然的趋势,其中应用型人才是我国经济建设和社会发展需求最多的一大类人才。为了促进自动化领域应用型人才培养,发挥院校之间相互合作的优势,北京大学出版社组织了此套《21 世纪全国高等院校自动化系列实用规划教材》。

参加这一系列教材编写的基本上都是来自地方工科院校自动化学科的专家学者,由此确定了教材的使用范围,也为“实用教材”的定位找到了落脚点。本系列教材具有如下特点:

(1) 注重实用性。地方工科院校的人才培养规格大多定位在高级应用型,对这一大类人才的培养要注重面向工程实践,培养学生理论联系实际、解决实际问题的能力。从这一教学原则出发,本系列教材注重实用性,注意引用工程中的实例,培养学生的工程意识和工程应用能力,因此将更适合地方工科院校的教学要求。

(2) 体现新颖性。更新教材内容,跟进时代,加入一些新的先进实用的知识,同时淘汰一些陈旧过时的内容。

(3) 院校间合作交流的果。每一本教材都有几所院校的教师参加编写。北大出版社事先在西安市和长春市召开了编写计划会和审纲会,来自各院校的教师比较充分地交流了情况,在相互借鉴、取长补短的基础上,形成了编写大纲,确定了编写原则。因此,这一系列教材可以反映出各参编院校一些好的经验和做法。

(4) 这一系列教材几乎涵盖了自动化类专业从技术基础课到专业课的各门课程,到目前为止,列入计划的已有 30 多门,教材门数多,参与的院校多,参加编写人员多。

地方工科院校是我国高等院校中比例最大的一部分。本系列教材面向地方工科院校自动化类专业教学之用，将拥有众多的读者。教材专家编审委员会深感教材的编写质量对教学质量的重要性，在审纲会上强调了“质量第一，明确责任，统筹兼顾，严格把关”的原则，要求各位主编加强协调，认真负责，努力保证和提高教材质量。各位主编和编者也将尽职尽责，密切合作，努力使自己的作品受到读者的认可和欢迎。尽管如此，由于院校之间、编者之间的差异性，教材中还是难免会出现一些问题和不足，欢迎选用本系列教材的教师、学生提出批评和建议。

张德江

2006年1月

前 言

控制系统理论与技术已广泛应用于工农业生产、交通运输业、航天航空等众多部门，极大地提高了社会生产力水平，改善了人们的劳动生产条件，丰富与提高了人们的生活水平。在当今信息化时代，自动控制系统与装置无所不在，为人类的文明做出了巨大贡献。

控制系统仿真是近 20 多年来发展起来的一门新兴技术学科。它已成为对控制系统进行分析、设计和综合研究中一种很有效的手段。随着控制系统日益复杂化，控制任务多样化，而控制要求也愈来愈高，利用计算机进行仿真试验和研究，以及进一步实现计算机控制成为从事控制及相关行业的工程技术人员所必需掌握的一门技术。

MATLAB 语言是美国 Math Works 公司于 20 世纪 80 年代推出的高性能数值计算软件，MATLAB 语言具有功能强大的 Simulink 模块和控制工具箱，其分析与计算覆盖了控制系统的各个领域。

本书是在本着把先进的计算仿真软件 MATLAB 语言及其 Simulink 模块和控制理论与技术相结合的宗旨而编写的。运用 MATLAB 工具，能够简便、高效而精确地完成对控制系统的建模、仿真、分析与设计等工作。

本书是 21 世纪全国高等院校自动化系列实用规划教材之一，并按照教育部自动化类专业本科教学大纲编写的。教学学时约为 50 学时。该教材的七位编者都是在自动化专业一线从事教学多年，讲授本课程多个循环，积累了丰富经验的老师。本书在选材上，力图做到内容全面，重点突出，主要讲明基本理论与方法的实际应用。

全书共分为 7 章，第 1 章为绪论；第 2 章为 MATLAB 语言基础；第 3 章为控制系统数学模型及其转换；第 4 章为控制系统数字仿真；第 5 章为控制系统计算机辅助分析；第 6 章为控制系统计算机辅助设计；第 7 章为 Simulink 仿真工具。其中第 1 章由北京工商大学孙晓荣老师编写；第 2 章由西安邮电学院罗祖军老师编写；第 3 章由沈阳化工学院赵立杰老师编写；第 4 章由陕西科技大学郑恩让老师编写；第 5 章由太原科技大学李虹老师编写；第 6 章由西南科技大学聂诗良老师编写；第 7 章由长春工业大学张袅娜老师编写。全书由郑恩让老师和聂诗良老师统稿并定稿。

本书是多所大学合作编写的，得到了北京工商大学、长春工业大学、陕西科技大学、沈阳化工学院、太原科技大学、西安邮电学院、西南科技大学的支持。在此一并表示感谢。

由于时间仓促，加上编者学识水平有限，书中难免存在错误与疏漏之处，恳请广大读者批评指正。

编 者
2006 年 8 月

目 录

第 1 章 绪论	1	2.2.5 矩阵的乘方	27
1.1 控制系统仿真中的名词术语	1	2.2.6 矩阵的超越函数	28
1.1.1 系统	1	2.3 数组运算	29
1.1.2 控制系统	2	2.3.1 数组的加法和减法运算	29
1.1.3 控制系统模型	2	2.3.2 数组的乘法和除法	30
1.1.4 控制系统建模	3	2.3.3 数组的乘方运算	31
1.1.5 控制系统仿真	3	2.3.4 关系运算	31
1.2 控制系统仿真的基本概念	4	2.3.5 逻辑运算	32
1.2.1 仿真的定义	4	2.3.6 基本初等函数	34
1.2.2 控制系统仿真的分类	5	2.4 向量和下标	34
1.2.3 控制系统仿真的过程	6	2.4.1 向量的产生	34
1.3 仿真技术的发展概括及应用	8	2.4.2 下标	36
1.3.1 仿真技术的发展概括	8	2.4.3 0-1 向量的下标	37
1.3.2 仿真技术的应用	10	2.4.4 空矩阵	38
1.3.3 仿真技术的发展趋势	10	2.5 其他基本函数	39
习题	11	2.5.1 多变量函数	39
第 2 章 MATLAB 语言基础	12	2.5.2 矩阵建立函数	39
2.1 基础知识	13	2.5.3 大矩阵的建立	42
2.1.1 简单的矩阵输入	13	2.5.4 磁盘文件	43
2.1.2 矩阵的元素	14	2.5.5 外部程序的运行	44
2.1.3 变量和语句	16	2.6 数据分析	45
2.1.4 Who 命令和永久变量	17	2.6.1 列向分析	45
2.1.5 数字和算术表达式	18	2.6.2 默认值	47
2.1.6 复数和矩阵	18	2.6.3 除非法项	47
2.1.7 输出格式	20	2.6.4 回归及曲线拟合	48
2.1.8 HELP 功能	21	2.7 矩阵函数	49
2.1.9 退出 MATLAB 以及工作 空间的存储	23	2.7.1 三角分解法	50
2.2 矩阵运算	23	2.7.2 正交分解法	50
2.2.1 矩阵转置	23	2.7.3 奇异值分解法	51
2.2.2 矩阵的加法和减法	24	2.7.4 特征值分析法	53
2.2.3 矩阵的乘法	25	2.7.5 矩阵的秩	54
2.2.4 矩阵的除法	26	2.7.6 多项式	54
		2.8 绘图函数	56
		2.8.1 X-Y 坐标图	56

2.8.2 基本格式.....	57	状态空间形式	95
2.8.3 多条曲线.....	58	3.3.4 化连续状态方程为离散	
2.8.4 线和标号的类型.....	60	状态方程	96
2.8.5 虚数和复数.....	61	3.3.5 化状态空间模型为系统	
2.8.6 对数坐标、极坐标和		传递函数	98
直方图.....	63	3.4 系统模型的连接	101
2.8.7 三维图和网格曲面图.....	65	3.4.1 并联连接	102
2.8.8 屏幕控制.....	68	3.4.2 串联连接	103
2.8.9 坐标比例的选择.....	68	3.4.3 反馈连接	105
2.8.10 图形输出.....	69	3.4.4 混合连接	106
2.9 控制流程	69	3.5 模型实现	109
2.9.1 for 循环.....	70	3.5.1 能控标准型	109
2.9.2 while 循环.....	71	3.5.2 对角标准型	111
2.9.3 if 语句	72	3.5.3 利用 MATLAB 状态空间	
2.10 M 文件	73	模型的实现	115
2.10.1 文本文件.....	73	习题	117
2.10.2 函数文件.....	74	第 4 章 控制系统数字仿真	119
2.10.3 echo、input、pause 和		4.1 连续系统数值积分方法	119
keyboard 命令.....	75	4.1.1 欧拉法	119
2.10.4 字符串和宏命令.....	76	4.1.2 梯形法	120
2.10.5 外部程序.....	77	4.1.3 龙格-库塔法	120
2.11 输入和输出数据	78	4.1.4 微分方程数值积分的矩阵	
习题	78	分析方法	122
第 3 章 控制系统数学模型及其转换	81	4.1.5 数值积分方法的计算	
3.1 系统类型	81	稳定性	123
3.1.1 连续和离散系统.....	81	4.1.6 数值方法的计算精度、	
3.1.2 线性和非线性系统.....	82	速度、稳定性与步距的	
3.1.3 确定和随机系统.....	82	关系	125
3.2 控制系统常用数学模型	82	4.2 控制系统的结构及其描述	126
3.2.1 连续系统.....	83	4.2.1 控制系统的典型结构形式	126
3.2.2 离散系统.....	84	4.2.2 控制系统的典型环节描述	128
3.2.3 MATLAB 模型表示.....	85	4.2.3 控制系统的连接矩阵	129
3.3 利用 MATLAB 实现数学模型		4.3 面向结构图的数字仿真	130
之间的转换.....	92	4.3.1 典型闭环系统的数字仿真	130
3.3.1 化传递函数为状态方程.....	93	4.3.2 复杂连接的闭环系统	
3.3.2 化传递函数为零极点		数字仿真	136
增益形式.....	94	4.4 连续系统的离散相似法	143
3.3.3 化系统零极点增益形式为		4.5 非线性系统的数字仿真	152

4.6 计算机控制系统的数字仿真	159	6.3.1 PID 控制器的传递函数	223
4.6.1 采样控制系统的数学描述	160	6.3.2 PID 参数对控制性能的影响	224
4.6.2 采样控制系统的仿真方法	161	6.3.3 PID 控制器的设计	227
4.6.3 采样控制系统仿真程序实现	165	6.4 线性二次型指标最优控制系统设计	231
习题	168	6.4.1 线性二次型指标与代数黎卡提方程	231
第 5 章 控制系统计算机辅助分析	169	6.4.2 设计线性二次型指标最优控制的 MATLAB 函数	233
5.1 控制系统的稳定性分析	169	6.4.3 最优控制系统设计实例	233
5.1.1 特征方程根的求取	169	习题	236
5.1.2 利用传递函数的极点判断系统的稳定性	170	第 7 章 Simulink 仿真工具	238
5.1.3 利用李雅普诺夫第二法判别系统的稳定性	171	7.1 Simulink 建模	238
5.2 控制系统的时域分析	172	7.1.1 Simulink 模型窗口的建立	238
5.2.1 时域分析的一般方法	172	7.1.2 Simulink 模块库简介	239
5.2.2 常用时域分析函数	174	7.1.3 Simulink 模块的操作	245
5.2.3 时域分析应用实例	174	7.1.4 模块的连接	247
5.3 控制系统的频域分析	178	7.1.5 模块的参数修改	247
5.3.1 频域分析的一般方法	178	7.1.6 Simulink 模块的联机帮助系统	248
5.3.2 频域分析应用实例	183	7.1.7 Simulink 演示程序	248
5.4 根轨迹分析方法	188	7.1.8 Simulink 模型的输出与打印	249
5.4.1 幅值条件和相角条件	189	7.1.9 Simulink 模型举例	250
5.4.2 绘制根轨迹的基本规则	190	7.2 Simulink 的仿真方法	251
5.4.3 根轨迹分析应用实例	193	7.2.1 仿真过程的设置	251
习题	201	7.2.2 系统仿真	255
第 6 章 控制系统计算机辅助设计	204	7.2.3 模糊控制系统的仿真	256
6.1 概述	204	7.3 S-函数	261
6.2 超前/滞后校正器的 Bode 图设计	204	7.3.1 S-函数的工作方式	261
6.2.1 超前校正器的 Bode 图设计	205	7.3.2 用 MATLAB 语言编写 S-函数	263
6.2.2 滞后校正器的 Bode 图设计	212	参考文献	269
6.2.3 滞后-超前校正器的 Bode 图设计	218		
6.3 PID 控制器设计	222		

第 1 章 绪 论

控制系统仿真是近 20 多年来发展起来的一门新兴技术学科。它已成为对控制系统进行分析、设计和综合研究中一种很有效的手段。特别是在计算机高度发展的今天,所研究设计的控制系统日益复杂化,控制任务多样化,而控制要求也愈来愈高,利用计算机进行仿真试验和研究,以及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需掌握的一门技术。

当在实际系统上进行实验,比较危险或者难以实现时,仿真技术就成了十分重要,甚至必不可少的工具。如导弹飞行、宇航、反应堆控制等不经过仿真就直接进行实验,将会对人类的生命和健康带来很大的危险。这时,就需要把实际系统建立成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。在我国,仿真技术开始也只是局限在少数领域内,近年来,由于数字计算机的普遍应用,应用数字计算机对实际系统进行仿真的技术日益受到人们的重视,其应用也愈来愈广泛。逐步发展到了电力、冶金、机械等一些主要工业部门,现在进一步扩大到了生态系统、石油化工等各行业。

本章主要说明控制系统、控制系统模型和控制系统仿真等基本概念,并用简单的例子说明控制系统仿真的基本步骤,最后,介绍其应用范围及发展方向。

1.1 控制系统仿真中的名词术语

1.1.1 系统

不同的领域对于系统的含义有不同的解释。在控制工程中,系统的定义为:由相互联系、相互作用的物体所形成的具有特定功能和运动规律的有机整体。

例如:一个大型钢铁联合企业可以看作是一个系统,它由相互联系和相互作用的采矿、选矿、炼铁、炼钢、轧钢等工厂有机的组合在一起。

又如:一个工厂管理系统,它可由生产管理部门、原材料仓库、生产加工车间、销售服务部门等组成,各部门是相互联系和相互作用的。

诸如此类的还有温度控制系统、速度调节系统、交通管理系统、民航订票系统、生态监控系统等。

一般来说,构成一个系统应具备以下三大要素。

(1) 实体。系统是由一些相互联系的实际物体组合而成的,这些物体称为实体。如图 1.1 所示的温度控制系统,它就是由比较器、调节器、加热炉、温度传感器等装置组合而成的;

(2) 属性。组成系统的每个实体都具备一定的特征,即系统的属性。例如图 1.1 温度控制系统中的温度、偏差值、干扰量、燃料量等就是实体的属性;

(3) 活动。作为系统三大要素之一的是系统内部发生的变化过程,称之为活动。在温度控制系统中,以调节电压或燃料的输入量作为主要的活动。

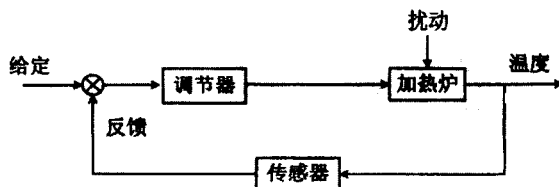


图 1.1 温度控制系统

总之，自然界中的系统是形形色色的，不论其外在形状或内部构造存在怎样的差别，但总归是由一些实体组成，每个实体有一些主要属性，整个系统则有其主要的活动。

由此，实体、属性、活动就构成了系统的三大要素。

1.1.2 控制系统

在工业生产过程中，为了实现特定的控制目标，控制系统具有两种不同的工作方式，即手动控制和自动控制。按照手动控制方式工作的控制系统称为手动控制系统，按照自动控制方式工作的控制系统称为自动控制系统。

手动控制系统：需要在人的直接参与下才能使被控对象(生产设备或装置)按照预先确定的理想规律运动，以达到控制目标的要求。在手动控制系统中，操作者需要频繁地调整对被控对象的控制作用，才能保证控制目标的实现，因此操作人员的劳动强度很大，而且常常出现控制作用不够及时、不够准确的现象，系统的控制精度较低，从而影响产品质量。

自动控制系统：不需要人的直接参与，通过控制装置代替人的控制作用，使被控对象按照预先确定的理想规律运动，以达到控制目标的要求。自动控制系统可以将操作人员从繁杂的工作中解脱出来，大大降低了劳动强度，改善了工作环境，而且控制作用及时、准确，可使控制系统达到较高的控制精度，大大提高生产效率和产品质量。因此实现生产过程的自动化是促进生产力高速发展的重要手段。

1.1.3 控制系统模型

控制系统模型是对控制系统的特征与变化规律的一种定量抽象，是人们用来认识事物的一种手段，一般有以下几种模型。

(1) 物理模型：根据相似原理，把真实系统按比例放大或缩小制成的模型，其状态变量与原系统完全相同。

例如，在飞行器的研制中，将其置放在“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，其满足“环境相似”的基本原则。又如，在船舶设计制造中，常常按一定的比例尺缩小建造一个船舶模型，然后将其置放在水池中进行各种动态性能的实验研究，其满足“几何相似”的基本原则，是模拟水中情况的物理模型的仿真实验研究。

在物理模型上所作的仿真实验研究具有效果逼真、精度高等优点；但是，其造价高昂，或者耗时过长，不宜为广大的研究人员所接受，大多是在一些特殊场合下(比如，导弹或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仿真等)采用。

(2) 数学模型：用数学方程(或信号流图、结构图)来描述系统性能模型。数学模型又

分静态模型和动态模型。

如果其变量不含时间因素则为静态模型，如果与时间有关，则为动态模型，数学模型分类可用表 1-1 表示。

表 1-1 数学模型分类表

模型类型	静态系统模型	动态系统模型			
		连续模型		离散模型	
		集中参数	分布参数	时间离散	随机离散
数学描述	代数方程	微分方程、 传递函数、 状态方程	偏微分方程	差分方程、 z 变换离散 状态方程	概率分布、 排队论
应用举例	系统稳态解	工程动力学、 系统动力学	热传导问题	计算机数据采样系统、 计算机控制系统	交通系统、 市场系统、 电话系统

数学模型是用数学符号描述系统状态变化关系的数学表达式，系统的属性由变量表示，静态模型仅能表示系统处于平衡状态下的属性。动态模型则描述系统属性随时间而发生的变化。

随着计算机与微电子技术的飞速发展，人们越来越多地采用数学模型在计算机上进行仿真实验研究。在数学模型上所进行的仿真实验是建立在“性能相似”的基本原则之上的。因此，通过适当的手段与方法建立高精度的数学模型是其前提条件。

1.1.4 控制系统建模

控制系统建模就是以一定的理论为依据，把系统的行为概括为数学的函数关系。其包括以下内容：

- (1) 确定模型的结构，建立系统的约束条件，确定系统的实体、属性与活动。
- (2) 测取有关的模型数据。
- (3) 运用适当理论建立系统的数学描述。
- (4) 检验所建立的数学模型的准确性。

由于控制系统的数字仿真以其“数学模型”为前提的，所以对于仿真结果的“可靠性”来讲，系统建模至关重要，它在很大程度上决定了数字仿真实验的“成败”。

长期以来，由于人们对系统建模重视不够，使得数字仿真技术的应用仅仅限于“理论上的探讨”，缺乏对实际工作的指导与帮助，因而在一部分人的思想概念中产生了“仿真结果不可信”或“仿真用处不大”的错误认识。

现代的数字仿真技术已日趋完善地向人们提供强有力的仿真软件工具，从而对“系统建模”的要求越来越高，因此应予以充分的重视与熟练的掌握。

1.1.5 控制系统仿真

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，将其放到计算机上进行相应的处理，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 1.2 所示。由图可见, 将实际系统抽象为数学模型, 称之为一次模型化, 它还涉及到系统辨识技术问题, 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, 称之为二次模型化, 这涉及到仿真技术问题, 统称为仿真实验。

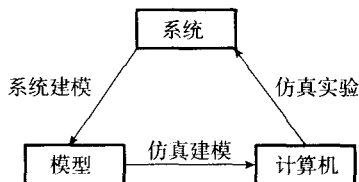


图 1.2 控制系统仿真三要素及其关系

系统: 研究的对象;

模型: 系统的抽象;

仿真: 对模型的实验;

系统建模: 系统辨识技术范畴;

仿真建模: 即针对不同形式的系统模型研究其求解算法;

仿真实验: 仿真程序的检验及将仿真结果与实际系统的行为进行比较。

1.2 控制系统仿真的基本概念

1.2.1 仿真的定义

通常为了研究、分析与设计系统, 需要对某些系统进行试验。试验的方案有两种, 一种是直接在真实系统上进行, 另一种则是按真实系统的“样子”构造一个模型, 在模型上进行。通常由于以下原因而不采用在真实系统上做试验的方案。

(1) 系统还处于设计阶段, 并没有真正建立起来, 因此不可能在真实系统上进行试验。

(2) 在真实系统上做试验会破坏系统的运行, 例如在一个化工系统中随意改变一下系统参数, 可能导致整个一炉成品报废; 又如在经济活动中, 随意把一个决策付之行动, 可能会引起经济混乱。

(3) 如果人是系统的一部分时, 由于知道自己是试验的一部分, 其行动往往会和平时不一样, 因此会影响试验的效果。

(4) 在实际系统上做多次试验时, 很难保证每一次的操作条件都相同, 因而无法对试验结果的优劣作出正确的判断与评价。

(5) 试验时间太长或费用太大或者有危险。

(6) 无法复原, 例如: 改建一个加热炉, 想要检查一下改建的加热炉的效率与质量, 不能先改建起来试试看, 因为一改建就不可能再回到原来的状态上去了。

因而, 在模型上做试验成为对系统进行分析、研究十分有效的手段, 从广义上来说, 为了分析研究, 首先建立系统的模型, 然后在模型上进行试验这一过程就称为系统仿真。

因此, 仿真是基于模型对实际系统进行实验研究的过程。即模仿真实事物。

1.2.2 控制系统仿真的分类

1. 按仿真模型的种类划分

(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试验研究，称之为物理仿真。物理仿真是应用几何相似原理，仿制一个与实际系统工作原理相同、质地相同但是体积小得多的物理模型进行实验研究。

① 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制成物理模型，其状态变量与原系统完全相同。这种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试验，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。

② 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，称为静态模型；若模型中的变量包含有时间因素在内则称为动态模型。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。例如汽车发动机试验、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，例如采用微分方程、状态方程等。

(2) 离散事件系统仿真。系统的状态变化只是在离散时刻发生，且由某种随机事件驱动，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。

1.2.3 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有以下几个方面。

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静态模型;描述控制系统各变量间动态关系采用动态模型。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。

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。

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作相应的检验和修改,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。

控制系统仿真的过程如图 1.3 所示。

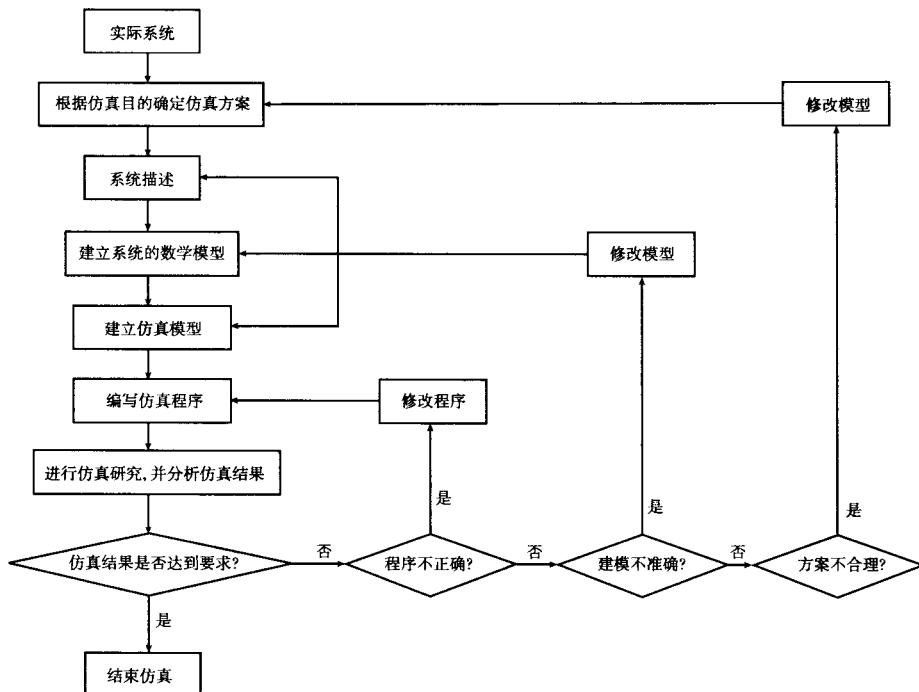


图 1.3 控制系统仿真过程示意图

下面我们用一个具体的例子说明仿真的过程。

【例 1.1】飞机跟踪问题，如图 1.4 所示。

(1) 问题描述。设有一架飞机追踪一敌机，为保证在射程内能进行攻击，所以飞机在跟踪时，需不断改变方向以保持机头始终指向目标。设两机离 10km 以下时，飞机可以攻击，但是限定必须在 12min 之内完成追踪任务，否则就认为追踪失败。

假设：

- ① 两机始终航行在同一水平面。
- ② 敌机航线已知， $(X_B(t), Y_B(t))$ 。
- ③ 飞机等速飞行， $V_F=20\text{km/min}$ 。每分钟改变一次航向，在 1min 内保持不变。
- ④ 飞机初始位置， $Y_F(0)=50$ ， $X_F(0)=0$ 。

问，飞机应按什么航线飞行？何时完成追踪任务？

(2) 建立数学模型。飞机位置

$$\begin{cases} X_F(t+1) = X_F(t) + V_F \cos \theta \\ Y_F(t+1) = Y_F(t) + V_F \sin \theta \\ \sin \theta = \frac{Y_B - Y_F}{D(t)} \\ \cos \theta = \frac{X_B - X_F}{D(t)} \end{cases}$$