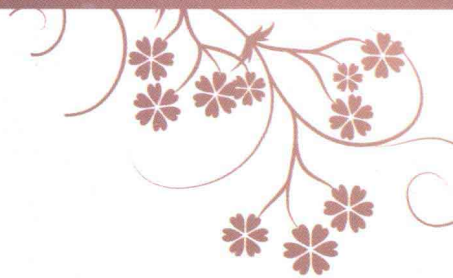


21世纪高等学校规划教材 | 电子信息



控制系统MATLAB 仿真与设计

杨佳 许强 徐鹏 余成波 编著



清华大学出版社

21世纪高等学校规划教材 | 电子信息

控制系统MATLAB 仿真与设计

杨佳 许强 徐鹏 余成波 编著

清华大学出版社
北京

内 容 提 要

本书介绍控制系统的 MATLAB 仿真与设计,全书共分 7 章。第 1 章介绍计算机仿真技术的发展概况、控制系统计算机辅助设计的主要内容及其应用以及控制系统计算机辅助设计领域的新方法,第 2 章介绍 MATLAB 语言程序设计基础,第 3 章重点介绍线性控制系统的数学模型的建立方法,第 4 章重点介绍线性控制系统的计算机辅助分析,第 5 章重点介绍 Simulink 在系统仿真中的应用,第 6 章重点介绍控制系统计算机辅助设计,第 7 章重点介绍智能控制系统设计方法。本书还介绍了控制系统仿真的 MATLAB 实验平台,设计了控制类课程的基础性仿真实验,每章末编有一定数量的习题,主要用以检验、理解基本概念和熟练分析方法。

本书可作高等工科院校自动化、计算机、电子信息、通信等学科本科生的教材,也可供研究生以及从事有关科技人员学习参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

控制系统 MATLAB 仿真与设计/杨佳等编著. —北京:清华大学出版社,2012.4

(21 世纪高等学校规划教材·电子信息)

ISBN 978-7-302-26433-0

I. ①控… II. ①杨… III. ①自动控制系统—系统仿真—软件包,MATLAB IV. ①TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 163716 号

责任编辑:魏江江 徐跃进

封面设计:傅瑞学

责任校对:李建庄

责任印制:杨 艳

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课 件 下 载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 刷 者:北京富博印刷有限公司

装 订 者:北京市密云县京文制本装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:14.75 字 数:367 千字

版 次:2012 年 4 月第 1 版 印 次:2012 年 4 月第 1 次印刷

印 数:1~3000

定 价:26.00 元

产品编号:037313-01

编审委员会成员

东南大学
南京大学
南京航空航天大学
解放军理工大学

上海大学
上海交通大学

华中科技大学

华中师范大学
武汉理工大学

宁波大学
天津大学

中国科学技术大学

苏州大学
山东大学
山东科技大学
东北师范大学
沈阳工业学院
长春大学
吉林大学
湖南大学
长沙理工大学
华南理工大学

王志功	教授
王新龙	教授
王成华	教授
邓元庆	教授
刘景夏	副教授
方 勇	教授
朱 杰	教授
何 晨	教授
严国萍	教授
朱定华	教授
吴彦文	教授
刘复华	教授
李中年	教授
蒋刚毅	教授
王成山	教授
郭维廉	教授
王煦法	教授
郭从良	教授
徐佩霞	教授
赵鹤鸣	教授
刘志军	教授
郑永果	教授
朱守正	教授
张秉权	教授
张丽英	教授
林 君	教授
何怡刚	教授
曾喆昭	教授
冯久超	教授

西南交通大学

冯全源 教授

金炜东 教授

重庆工学院

余成波 教授

重庆通信学院

曾凡鑫 教授

重庆大学

曾孝平 教授

重庆邮电学院

谢显中 教授

张德民 教授

西安电子科技大学

彭启琮 教授

樊昌信 教授

西北工业大学

何明一 教授

集美大学

迟 岩 教授

云南大学

刘惟一 教授

东华大学

方建安 教授

出版说明

随着我国改革开放的进一步深化,高等教育也得到了快速发展,各地高校紧密结合地方经济建设发展需要,科学运用市场调节机制,加大了使用信息科学等现代科学技术提升、改造传统学科专业的投入力度,通过教育改革合理调整和配置了教育资源,优化了传统学科专业,积极为地方经济建设输送人才,为我国经济社会的快速、健康和可持续发展以及高等教育自身的改革发展做出了巨大贡献。但是,高等教育质量还需要进一步提高以适应经济社会发展的需要,不少高校的专业设置和结构不尽合理,教师队伍整体素质亟待提高,人才培养模式、教学内容和教学方法需要进一步转变,学生的实践能力和创新精神亟待加强。

教育部一直十分重视高等教育质量工作。2007年1月,教育部下发了《关于实施高等学校本科教学质量与教学改革工程的意见》,计划实施“高等学校本科教学质量与教学改革工程”(简称“质量工程”),通过专业结构调整、课程教材建设、实践教学改革、教学团队建设等多项内容,进一步深化高等学校教学改革,提高人才培养的能力和水平,更好地满足经济社会发展对高素质人才的需要。在贯彻和落实教育部“质量工程”的过程中,各地高校发挥师资力量强、办学经验丰富、教学资源充裕等优势,对其特色专业及特色课程(群)加以规划、整理和总结,更新教学内容、改革课程体系,建设了一大批内容新、体系新、方法新、手段新的特色课程。在此基础上,经教育部相关教学指导委员会专家的指导和建议,清华大学出版社在多个领域精选各高校的特色课程,分别规划出版系列教材,以配合“质量工程”的实施,满足各高校教学质量和教学改革的需要。

为了深入贯彻落实教育部《关于加强高等学校本科教学工作,提高教学质量的若干意见》精神,紧密配合教育部已经启动的“高等学校教学质量与教学改革工程精品课程建设工作”,在有关专家、教授的倡议和有关部门的大力支持下,我们组织并成立了“清华大学出版社教材编审委员会”(以下简称“编委会”),旨在配合教育部制定精品课程教材的出版规划,讨论并实施精品课程教材的编写与出版工作。“编委会”成员皆来自全国各类高等学校教学与科研第一线的骨干教师,其中许多教师为各校相关院、系主管教学的院长或系主任。

按照教育部的要求,“编委会”一致认为,精品课程的建设工作从开始就要坚持高标准、严要求,处于一个比较高的起点上。精品课程教材应该能够反映各高校教学改革与课程建设的需要,要有特色风格、有创新性(新体系、新内容、新手段、新思路,教材的内容体系有较高的科学创新、技术创新和理念创新的含量)、先进性(对原有的学科体系有实质性的改革和发展,顺应并符合21世纪教学发展的规律,代表并引领课程发展的趋势和方向)、示范性(教材所体现的课程体系具有较广泛的辐射性和示范性)和一定的前瞻性。教材由个人申报或各校推荐(通过所在高校的“编委会”成员推荐),经“编委会”认真评审,最后由清华大学出版

社审定出版。

目前,针对计算机类和电子信息类相关专业成立了两个“编委会”,即“清华大学出版社计算机教材编审委员会”和“清华大学出版社电子信息教材编审委员会”。推出的特色精品教材包括:

(1) 21 世纪高等学校规划教材·计算机应用——高等学校各类专业,特别是非计算机专业的计算机应用类教材。

(2) 21 世纪高等学校规划教材·计算机科学与技术——高等学校计算机相关专业的教材。

(3) 21 世纪高等学校规划教材·电子信息——高等学校电子信息相关专业的教材。

(4) 21 世纪高等学校规划教材·软件工程——高等学校软件工程相关专业的教材。

(5) 21 世纪高等学校规划教材·信息管理与信息系统。

(6) 21 世纪高等学校规划教材·财经管理与应用。

(7) 21 世纪高等学校规划教材·电子商务。

(8) 21 世纪高等学校规划教材·物联网。

清华大学出版社经过三十多年的努力,在教材尤其是计算机和电子信息类专业教材出版方面树立了权威品牌,为我国的高等教育事业做出了重要贡献。清华版教材形成了技术准确、内容严谨的独特风格,这种风格将延续并反映在特色精品教材的建设中。

清华大学出版社教材编审委员会

联系人: 魏江江

E-mail: weijj@tup.tsinghua.edu.cn

近年来,随着工业自动化的普及与发展,对专业技术人员进行系统设计提出了更高的指标要求,为了适应工业控制系统设计的发展趋势,借助计算机对系统进行仿真分析与设计就成了控制工程师所必须熟练掌握的重要知识与技能。控制系统的计算机仿真分析与 CAD 是建立在控制理论、数值方法、计算机技术基础上的综合学科,目前已成为自动控制学科的重要研究分支,并对复杂控制系统的分析设计、自动控制理论及技术的应用与发展起到越来越重要的作用。

自 20 世纪 90 年代各种计算机语言以及专业仿真软件出现,特别是 1993 年的 MATLAB 4. x 版以及随后推出的“5. x”版为控制系统计算机仿真分析与 CAD 提供了有力的工具,同时也使传统的计算机仿真与 CAD 的方法和手段发生了重大改变。原来系统分析设计中所必需的复杂数学分析与运算,利用 MATLAB 及其相关的工具箱就可以方便地加以实现。目前在欧美国家,MATLAB(Simulink)已广泛应用于科学研究、工程设计计算等方面。在国内,MATLAB 也已在高等学校获得推广,同时也引起广大工程技术人员的极大关注。

为了使学生能够应用先进的仿真工具,我们进行了控制类课程实验改革,采用当今广为流行的 MATLAB 语言来设计控制类课程的课程实验。本书介绍了控制系统仿真的 MATLAB 实验平台,设计了控制类课程的基础性仿真实验,共分 7 章。

- 第 1 章介绍计算机仿真技术的发展概况、控制系统计算机辅助设计的主要内容及其应用以及控制系统计算机辅助设计领域的新方法。
- 第 2 章介绍 MATLAB 语言程序设计基础,包括基本数学运算、MATLAB 语言的流程结构、函数编写与调试、图形绘制等基础知识。
- 第 3 章重点介绍线性控制系统的数学模型的建立方法,包括线性连续系统模型及 MATLAB 表示、线性离散时间系统的数学模型、方框图描述系统的化简、系统模型的相互转换、线性系统的模型降阶与线性系统的模型辨识。
- 第 4 章重点介绍线性控制系统的计算机辅助分析,包括时域分析法、根轨迹分析法、频域分析法、线性系统状态空间分析以及系统稳定性分析。
- 第 5 章重点介绍 Simulink 在系统仿真中的应用,包括 Simulink 的模块库简介、Simulink 功能模块的处理、仿真设置、自定义功能模块以及 S 函数设计与应用。
- 第 6 章重点介绍控制系统计算机辅助设计,包括基于频域法的单变量控制系统计算机辅助设计、多变量系统设计的现代频域方法简介、PID 控制器的计算机仿真与辅助设计、基于时域的线性控制系统计算机辅助设计以及工程应用实例。
- 第 7 章重点介绍智能控制系统设计方法,包括模糊控制器设计、神经网络及神经网络控制器设计以及基于遗传算法的最优控制器设计。

全书由余成波、杨佳统稿,参加编写有重庆理工大学杨佳(第 1~第 3 章)、重庆工商大

学许强(第4、第5章)、重庆理工大学徐鹏(第6、第7章),全书由余成波主审。唐海燕、张进、余婷、闫俊辉、刘峪瑄、张一萌、熊飞、余磊、谭俊、李芮、何强等同志参加了本书审核与编排工作。

本书编写不足之处、恳请专家同仁与广大读者批评指正。

作 者

2012年1月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 仿真技术简介	1
1.1.1 仿真技术的基本概念和分类	1
1.1.2 计算机仿真的基本过程	2
1.2 计算机仿真技术的发展概况	4
1.2.1 硬件发展	4
1.2.2 软件发展	4
1.3 计算机仿真技术的应用	5
1.4 控制系统计算机仿真与辅助设计概述	6
1.5 基于 MATLAB 的控制系统仿真的现状	7
1.6 仿真技术的发展趋势	8
1.7 本书的基本结构和内容	9
习题	9
第 2 章 MATLAB 语言程序设计基础	10
2.1 MATLAB 语言简介	10
2.1.1 MATLAB 语言的应用	10
2.1.2 MATLAB 语言的发展概况	10
2.2 MATLAB 数值运算基础	12
2.2.1 MATLAB 语言的变量与常量	12
2.2.2 MATLAB 语言的数据结构	13
2.2.3 MATLAB 语言的基本语句结构	14
2.2.4 冒号表达式与子矩阵提取	16
2.2.5 方括号表达式	17
2.3 基本数学运算	17
2.3.1 数组、矩阵的概念	17
2.3.2 数组或矩阵的创建	18
2.3.3 数组或矩阵元素的定位	20
2.3.4 数组或矩阵的算术运算	22
2.3.5 数组或矩阵的关系运算和逻辑运算	28
2.3.6 矩阵函数	29
2.3.7 基本数论运算	33

2.3.8	多项式及其运算	35
2.3.9	解析结果的化简与变换	38
2.4	MATLAB 程序流程控制	39
2.4.1	顺序结构语句	39
2.4.2	循环结构	40
2.4.3	条件转移结构	41
2.4.4	开关结构	43
2.4.5	试探结构	44
2.4.6	MATLAB 程序设计基本规则	44
2.5	函数编写与调试	45
2.5.1	MATLAB 语言函数的基本结构	46
2.5.2	内联函数与匿名函数	48
2.6	MATLAB 二维图形绘制功能	49
2.6.1	二维图形绘制	49
2.6.2	图形注释及坐标、刻度的设置	54
2.6.3	其他二维图形绘制语句	56
2.6.4	图形修饰	57
2.7	三维图形表示	58
2.7.1	三维曲线绘制	58
2.7.2	三维网线和曲面绘制	59
2.7.3	三维图形视角设置	60
2.8	MATLAB 语言与现代科学运算	61
2.8.1	线性代数问题的 MATLAB 求解	61
2.8.2	常微分方程问题的 MATLAB 求解	67
2.8.3	数据拟合、插值和样条问题的 MATLAB 求解	70
2.9	本章小结	74
	习题	75
第 3 章	线性控制系统的数学模型	77
3.1	线性定常系统模型	77
3.1.1	线性定常系统的传递函数模型	77
3.1.2	线性系统的零极点增益模型	79
3.1.3	线性系统的状态空间模型	80
3.2	线性离散时间系统的数学模型	81
3.2.1	脉冲传递函数模型	81
3.2.2	离散零极点增益模型	82
3.2.3	离散状态方程模型	82
3.3	线性定常系统模型的属性	83
3.3.1	LTI 模型对象的属性描述	83

3.3.2 访问 LTI 模型的属性	85
3.4 线性系统数学模型之间的相互转换	86
3.4.1 连续模型和离散模型的相互转换	86
3.4.2 系统传递函数的获取	89
3.4.3 LTI 对象属性之间的转换	89
3.5 方框图模型的连接和化简	90
3.5.1 控制系统的典型连接结构	91
3.5.2 节点移动时的等效变换	93
3.5.3 复杂系统模型的连接和简化	94
3.6 本章小结	95
习题	96
第 4 章 线性控制系统的计算机辅助分析	98
4.1 时域分析法	98
4.1.1 引言	98
4.1.2 时域响应分析	98
4.1.3 MATLAB 在时域分析中的应用	99
4.1.4 系统的稳定性分析	104
4.1.5 综合实例及 MATLAB/Simulink 应用	107
4.2 根轨迹分析法	110
4.2.1 引言	110
4.2.2 根轨迹定义	111
4.2.3 根轨迹法基础	111
4.2.4 其他形式的根轨迹	112
4.2.5 综合实例及 MATLAB 应用	114
4.3 频域分析法	115
4.3.1 引言	115
4.3.2 频率特性基本概念	115
4.3.3 频率特性的表示方法	116
4.3.4 频率响应分析	118
4.3.5 MATLAB 在频率法中的应用	118
4.4 线性系统状态空间分析	129
4.4.1 引言	129
4.4.2 线性系统状态空间基础	130
4.4.3 线性系统的状态可控性与状态可观性	133
4.4.4 线性系统稳定性分析	138
4.4.5 综合实例及 MATLAB 应用	140
4.5 本章小结	143
习题	143

第 5 章 Simulink 在系统仿真中的应用	144
5.1 Simulink 仿真概述	144
5.2 Simulink 的模块库简介	144
5.3 Simulink 功能模块的处理	149
5.4 Simulink 仿真设置	151
5.5 Simulink 仿真举例	154
5.6 Simulink 自定义功能模块	159
5.6.1 Simulink 子系统简介	159
5.6.2 Simulink 高级子系统应用	160
5.6.3 封装子系统	161
5.7 S 函数设计与应用	167
5.7.1 S 函数设计	168
5.7.2 S 函数的应用	169
5.8 本章小结	171
习题	171
第 6 章 控制系统计算机辅助设计	173
6.1 引言	173
6.2 频率法串联超前滞后校正	173
6.2.1 串联超前校正	173
6.2.2 串联滞后校正	176
6.2.3 串联滞后-超前校正	179
6.3 基于状态空间模型的控制器设计方法	182
6.3.1 状态反馈控制	183
6.3.2 极点配置控制器设计	183
6.3.3 线性二次型指标最优调节器	185
6.3.4 观测器设计及基于观测器的调节器设计	188
6.4 控制系统 PID 控制器设计法	192
6.4.1 PID 控制简述	192
6.4.2 PID 控制原理	192
6.4.3 PID 控制调节作用分析	193
6.4.4 PID 校正设计方法	196
6.5 仿真实例——球杆系统 PD 控制器设计	200
6.5.1 球杆系统模型分析	200
6.5.2 仿真分析	201
6.6 本章小结	203
习题	203

第 7 章 智能控制系统设计	205
7.1 引言	205
7.2 模糊控制及模糊控制器设计	205
7.2.1 模糊控制基本原理	205
7.2.2 模糊 PD 控制器设计	206
7.3 神经网络及神经网络控制器设计	210
7.3.1 神经网络简介	210
7.3.2 基于单个神经元 PID 控制器设计	211
7.3.3 基于反向传播神经网络的 PID 控制器	213
7.4 基于遗传算法的最优控制器设计	215
7.4.1 遗传算法基本原理	215
7.4.2 遗传算法求解函数最大值	216
7.4.3 基于遗传算法 PID 最优控制问题求解	217
7.5 本章小结	219
习题	219
参考文献	220

第 1 章 绪 论

1.1 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。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行性等,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并进行研究,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的过程。

1.1.1 仿真技术的基本概念和分类

1. 仿真技术的基本概念

系统,是物质世界中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。如果系统用于自动控制,则称之为自动控制系统。

模型,是对所要研究的系统在某些特定方面(如特征与变化规律)的抽象。通过模型对原型系统进行研究,将具有更深刻、更集中的特点。模型分为物理模型和数学模型两种。数学模型可分为机理模型、统计模型与混合模型。系统仿真,就是以系统数学模型为基础,以计算机为工具对系统进行实验研究的一种方法。需要特别指出的是,系统仿真使仿真更具意义。

2. 仿真技术的分类

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。依据这个原理,仿真可分为物理仿真、数学仿真和混合仿真。

物理仿真就是利用几何相似原理,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、可靠性高等特点,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物提供方便、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。本书主要讲解计算机仿真。

1.1.2 计算机仿真的基本过程

计算机仿真过程流程图如图 1-1 所示。

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。

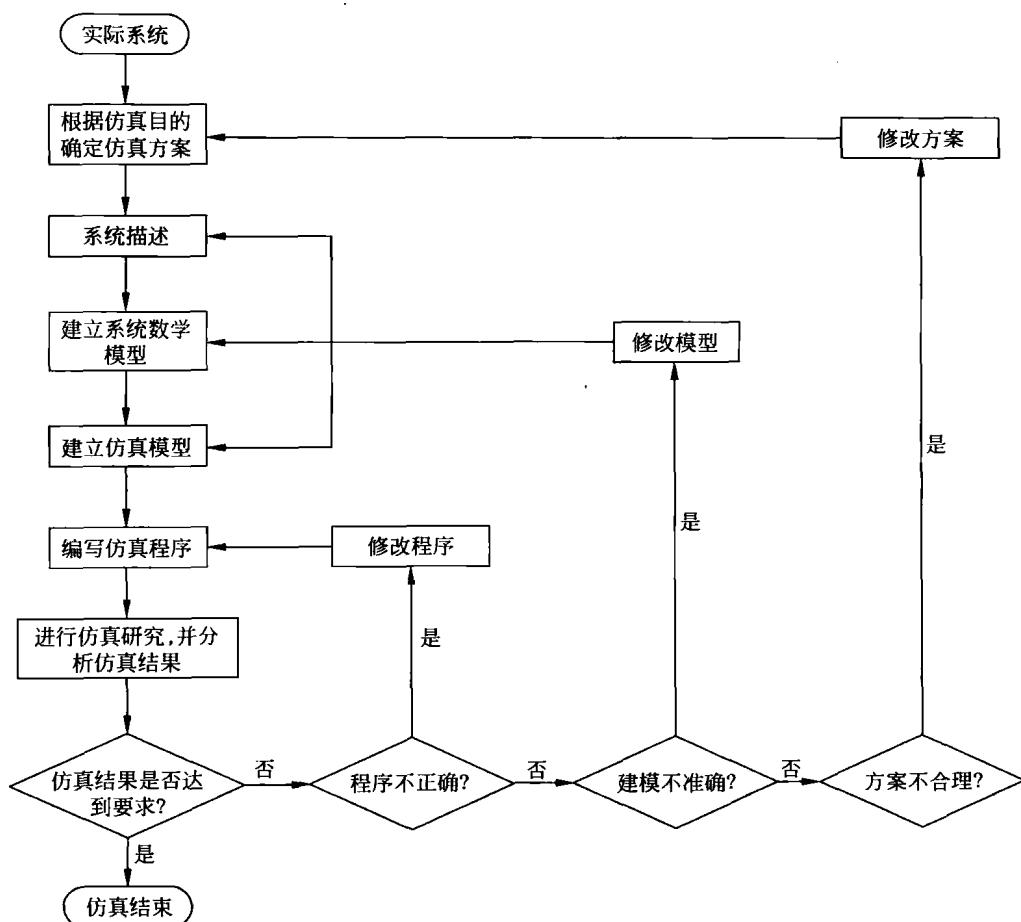


图 1-1 计算机仿真过程流程图

4. 编写仿真程序

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。