



普通高等教育“十三五”规划教材
中国轻工业联合会“十三五”规划教材

系统仿真与应用

◆ 党宏社 编著



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“十三五”规划教材 内容

中国轻工业联合会“十三五”规划教材

系统仿真与应用

党宏社 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书以帮助学生掌握仿真的方法和技术为目标,以信息系统的分析为背景,借鉴国外的有关做法,按照讲清概念、熟悉工具、学会使用的原则,重点阐述如何利用 MATLAB 工具分析问题,通过案例示范和多层次的项目训练,培养学生分析和解决问题的能力。全书分为 5 章,即系统仿真概述、MATLAB 应用基础、系统模型的建立与表示、系统的仿真分析和系统仿真实训。仿真实训的介绍涉及电路分析、信号分析和系统分析等,不局限于某一专业,着力介绍系统仿真的基本方法和技术。本教材既可以独立存在,也可以作为其他课程的仿真教材或辅助教材。

本书可作为电子信息类或电气信息类各专业的本科生教材,也可供有关技术人员参考。

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

系统仿真与应用/党宏社编著. —北京:电子工业出版社, 2018.8
ISBN 978-7-121-34723-8

I. ①系… II. ①党… III. ①系统仿真—高等学校—教材 IV. ①TP391.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 155976 号

策划编辑:赵玉山

责任编辑:赵玉山

印 刷:北京七彩京通数码快印有限公司

装 订:北京七彩京通数码快印有限公司

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:18 字数:460 千字

版 次:2018 年 8 月第 1 版

印 次:2018 年 8 月第 1 次印刷

定 价:45.00 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, 88258888。

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。

本书咨询联系方式:(010) 88254556, zhaoyz@phei.com.cn。

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的限制,不受时间与地点限制,不需要另外增加投资等特点而受到了人们越来越多的重视。

本书是在作者多年前出版的《控制系统仿真》和《信号与系统实验(MATLAB版)》(西安电子科技大学出版社,2007年)的基础上,根据作者近年来的教学实践与体会,以及目前大学教育的现状,重新修改、补充和完善而成的。

本书也是作者所承担的教育部首批新工科项目“面向中国制造2025具有轻工特色的自动化专业改造升级路径探索与实践”的成果之一,目前已经入选了中国轻工业联合会“十三五”规划教材。

在教材内容的处理与安排上主要考虑了如下几点:

1. 按照“讲清概念、掌握工具、学会使用”的原则,简化理论内容,增加系统建模与系统分析的实例;

2. 引入问题导向、项目式训练等方式,通过章前提示、章后小结、项目扩展和小结与体会等环节,着力培养学生独立思考和交流的能力;

3. 对仿真工具的介绍,打破常规,以会用工具解决问题为核心,按照数据流的走向分模块介绍,使学生的关注点始终在工具的使用,而不是只学习了一门计算机语言。

4. 课堂举例与项目训练相结合,从理论问题的求解到实际问题的分析,给出了大量的仿真示例;项目内容按照从简单到复杂的结构,从验证、模仿到设计三个层次逐级展开,达到了了解仿真过程、掌握仿真方法的目的,以培养学生利用所学知识分析和解决问题的能力。

这本书的使用对象是学过“信号与系统”“电路”等课程的电子信息类或电气信息类的本科生或研究生,既可以作为学习和掌握MATLAB的参考,也可以作为学习“信号与系统”“自动控制原理”“数字信号处理”等课程的参考资料。学习方式可以灵活多样,可以根据需要的相关内容取舍,只要能够会使用这一工具,就让作者深感欣慰了。

在本书的编写过程中,得到了电子工业出版社赵玉山老师的大力支持和鼓励,使作者能顺利完成书稿;研究生张卫江,高敏娟,侯金良,张梦腾,王晓庄,牟杰等完成了部分书稿的录入与校对工作;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,书中难免存在错误或不妥之处,恳请读者批评指正。

编者

2018年5月1日

目 录

第1章 系统仿真概述	(1)	第3章 系统模型的建立与表示	(55)
1.1 系统与模型	(1)	3.1 模型建立	(55)
1.1.1 系统	(1)	3.1.1 数学建模的概念	(55)
1.1.2 模型	(3)	3.1.2 数学建模方法简介	(56)
1.2 系统仿真的概念	(4)	3.1.3 机理分析建模方法	(56)
1.2.1 仿真的概念	(4)	3.2 模型表示	(60)
1.2.2 系统仿真的分类	(7)	3.2.1 系统的常微分方程模型	(60)
1.2.3 计算机仿真	(8)	3.2.2 系统的传递函数模型	(61)
1.3 系统仿真的过程与特点	(9)	3.2.3 系统的状态空间模型	(64)
1.3.1 系统仿真的特征	(9)	3.2.4 系统模型的其他形式	(66)
1.3.2 系统仿真的过程	(9)	3.3 模型转换	(69)
1.3.3 系统仿真的特点	(10)	3.3.1 系统的模型转换	(69)
1.4 仿真技术的发展与应用	(12)	3.3.2 复杂模型的处理方法	(77)
1.4.1 系统仿真的发展	(12)	3.4 系统模型的连接	(78)
1.4.2 仿真技术的应用	(12)	3.4.1 模型串联	(79)
1.4.3 仿真技术发展的主要方向	(13)	3.4.2 模型并联	(81)
本章小结	(13)	3.4.3 反馈连接	(83)
思考练习题	(14)	3.4.4 系统扩展	(84)
第2章 MATLAB 应用基础	(15)	本章小结	(86)
2.1 MATLAB 简介	(15)	思考练习题	(86)
2.1.1 发展概述	(15)	第4章 系统的仿真分析	(88)
2.1.2 主要特点	(16)	4.1 系统的稳定性分析	(88)
2.1.3 组成与界面	(17)	4.1.1 间接判别法	(89)
2.2 MATLAB 编程	(20)	4.1.2 直接判别法	(90)
2.2.1 基本语法	(20)	4.2 系统的时域分析	(99)
2.2.2 M 文件	(22)	4.2.1 系统的时域性能指标	(99)
2.2.3 数值输入	(24)	4.2.2 时域分析常用函数	(101)
2.2.4 流程控制	(29)	4.2.3 时域分析应用实例	(108)
2.2.5 绘图	(35)	4.3 系统的频域分析	(115)
2.3 Simulink 基础	(45)	4.3.1 频域分析的基本概念	(115)
2.3.1 简介	(45)	4.3.2 频域分析常用函数	(117)
2.3.2 应用基础	(46)	4.3.3 频域分析应用实例	(127)
2.3.3 仿真举例	(52)	4.4 系统的根轨迹分析	(140)
本章小结	(53)	4.4.1 概述	(140)
思考练习题	(53)	4.4.2 根轨迹分析函数	(142)

4.4.3 根轨迹分析应用实例.....	(145)	5.8 连续时间信号的傅里叶变换.....	(214)
4.5 系统的设计.....	(153)	5.9 离散时间信号的傅里叶变换.....	(220)
4.5.1 系统设计概述.....	(153)	5.10 信号的调制与解调.....	(229)
4.5.2 基于根轨迹图的校正方法.....	(154)	5.11 信号的采样与恢复.....	(234)
4.5.3 基于波特图的校正方法.....	(158)	5.12 连续 LTI 系统的时域分析.....	(243)
4.6 电路分析.....	(166)	5.13 离散 LTI 系统的时域分析.....	(247)
4.6.1 交流电路分析.....	(166)	5.14 连续系统的复频域响应.....	(251)
4.6.2 直流电路分析.....	(167)	5.15 连续 LTI 系统的根轨迹分析法.....	(256)
本章小结.....	(169)	5.16 离散系统的 z 域分析.....	(260)
思考练习题.....	(169)	5.17 连续系统的状态变量分析.....	(267)
第 5 章 系统仿真实训.....	(173)	5.18 离散系统的状态变量分析.....	(272)
5.1 常用连续信号的实现.....	(173)	5.19 数字滤波器设计初步.....	(275)
5.2 常用离散时间信号的实现.....	(183)	5.20 音频信号的采样与重构.....	(275)
5.3 连续时间信号的时域基本运算.....	(191)	5.21 线性系统稳定性分析.....	(276)
5.4 离散时间信号的时域基本运算.....	(198)	5.22 无失真传输系统.....	(277)
5.5 连续时间信号的卷积运算.....	(201)	附录 MATLAB 符号运算简介.....	(279)
5.6 离散信号的卷积和.....	(206)	参考文献.....	(281)
5.7 周期信号的合成与分解.....	(210)		

第1章 系统仿真概述

图 1.1 电路系统

本章要点:

1. 仿真的概念与特点;
2. 仿真的类别与过程;
3. 仿真的发展趋势。

本章简要介绍系统仿真的基本知识,如系统与模型的概念,系统仿真的基本概念,系统仿真的过程与特点,仿真技术的发展与应用。通过本章的介绍,使读者对系统仿真的概念与特点有一个基本的了解和认识。

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、能够实现某种目的的一个整体,即系统就是一个由多个部分组成的、按一定规律连接的、具有特定功能的整体。

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、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、电压源和开关等组成,就是一个简单而又典型的电路系统。

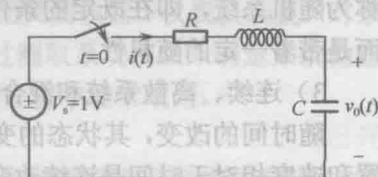
又如,各种用电器里常用的电池也是一个系统,它由阴极、阳极、电解液、外壳等组成,具有将化学能转化为电能的功能。

电动汽车也是一个系统,由电池、发电机、灯等组成,将电池所提供的电能,转化为机械能,为人们的出行提供方便。

“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、交通管理系统等称为非工程系统,而工程系统则覆盖了机电、化工、热力、流体等工程应用领域。本书侧重于介绍工程系统。

任何系统都存在四个方面的内容,即实体、属性、活动和环境。组成系统的具体的对象或单元称为实体,如图 1.1 中的电感、电容、电阻和电源等。实体的特性(状态和参数)称为属性,如电流、电压、功率等,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。环境表示系统所处的界面状况(包括干扰、约束等),包括那些影响系统而不受系统直接控制的全部因素。

由存在于系统内部的实体、属性、活动组成的整体称为系统状态,常用系统状态的变化来研究系统的动态情况。



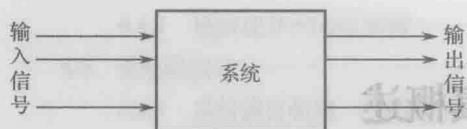


图 1.2 系统的表示

为了分析方便，系统一般可以用图 1.2 表示。

系统一般有输入端和输出端，输入端是接收信号的地方，输出端是输出信号的地方。内部结构与工作机理完全清晰的系统称为白箱系统，内部结构与工作机理部分清晰的系统称为灰箱系统，内部结构完全不

清楚的系统称为黑箱系统。加在输入端上的信号称为输入信号或激励信号；输入信号经过系统在输出端得到的信号称为输出信号或响应信号。

2. 系统的类型

系统的类型因分类的标准不同而异，如按自然属性可分为人造系统（如工程系统、社会系统等）和自然系统（如太阳系、海洋系统、生态系统等）；按物质属性可分为实物系统（如建筑物、计算机、机床、兵器等）和概念系统（如思想体系、管理、规章制度等）；按运动属性可分为静态系统（如静态平衡力系等）和动态系统（如人体系统、控制系统、经济系统、动力学系统等）；按有无反馈分为闭环系统和开环系统等。

常用的几种分类情况如下：

1) 静态和动态系统

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。系统的状态可随时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) 确定和随机系统

系统的状态和参数是确定的系统称为确定系统。而系统的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，系统从一个状态转换到另一个状态时是不确定的，而是带着一定的随机性。

3) 连续、离散系统和混合系统

随着时间的改变，其状态的变化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。若系统状态随时间间断地改变或突然变化则称为离散的，例如，工厂系统中的产品数量、服务系统中的队列长度。

在实际中，完全是连续或离散的系统都是很少见的，大多数系统中既有连续成分，也有离散成分，即一部分具有连续系统特性，另一部分具有离散系统特性，这样的系统就是连续-离散混合系统。实际系统往往是混合系统，例如，导弹的一、二级分离（质量变化），工厂中的机器运行等。

4) 线性和非线性系统

系统中所有元器件的输入、输出特性都是线性的系统称作线性系统，而只要有一个元器件的输入输出特性不是线性的系统则称作非线性系统，系统的参数不随时间改变的称为定常系统，本课程的研究对象主要是线性定常系统。

3. 系统研究的类型

对系统的研究一般有 3 种类型，即系统分析、系统设计和系统预测。

(1) 系统分析

系统分析的目的就是为了了解现有系统或拟建系统的性能和潜力。分析的方法是用系统做

试验,但实际上由于受实际条件的限制,往往先建立一个系统模型,通过研究该模型所得到的结果,再来分析实际系统的性能。即系统分析就是要了解一个已有的系统的性能或指标的过程。

(2) 系统设计

系统设计则是为了得到具有所需要的某些性能的系统,利用建立模型中得到的知识,对系统进行设计,使系统达到需要的性能。系统设计是系统分析的逆过程,目的就是根据一定的要求,实现一个新的系统。

(3) 系统预测

预测是对事物或现象将要发生的或不明确的情况进行预先的估计和推测。系统预测就是根据系统发展变化的实际数据和历史资料,运用科学的理论、方法和各种经验、判断、知识,去推测、估计、分析事物在未来一定时期内的可能变化情况。系统预测的实质是充分分析、理解待测系统及其有关主要因素的演变,以便找出系统发展变化的固有规律,根据过去和现在估计未来,根据已知预测未知,从而推断该系统的未来发展状况。

系统工程则是把系统分析和系统设计有机地结合起来,先了解现有系统的实际情况,后改进或自行设计新的系统。

4. 系统研究的方法

系统研究的方法主要包括解析法、实验法和仿真实验法三种。

(1) 理论分析(解析)法

运用已经掌握的理论知识对系统进行理论上的分析、计算,是一种纯理论意义上的分析方法,在对系统的认识过程中具有普遍意义。

(2) 实验法

实验法是针对已经建立(或已经存在)的实际系统,利用相关的仪器、仪表及装置,对系统施加一定类型的信号(或利用系统中正常的工作信号),通过测取系统响应来确定系统性能的方法。实验法具有简明、直观与真实的特点,在一般的系统分析中经常采用。

(3) 仿真实验法

仿真实验法就是在系统的模型上(物理的或数学的)进行系统性能分析与研究的实验方法,所遵循的基本依据是相似原理。

1.1.2 模型

模型是一个系统(实体、现象、过程)的物理的、数学的或其他逻辑的表现形式。

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。系统模型实质上是一个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。

对于多数研究目的,建立系统模型并不需要考虑系统的全部细节,一个好的模型不仅可以用来代替系统,而且是这个系统的合理简化,与此相联系的是要正确地确定模型的详细参数和精度。用来表示一个系统的模型并不是唯一的,对于同一个系统,当研究目的不同,所要求收集的与系统有关的信息也是不同的;由于关心的方面不同,对于同一个系统就可能建立不同的模型。

系统模型不应该比研究目的所要求的更复杂,模型的详细程度和精度必须与研究目的相匹配;可以各种可用的形式(数学的或实体的(物理的))给出被研究系统的信息,它具有与系统相似的数学描述或物理属性。

系统模型一般可以分为物理模型和数学模型两种。

1) 物理模型

物理模型是根据实际系统、利用实物建立起来的模型。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,如风洞实验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。

2) 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,是描述实际系统内、外部各变量间相互关系的数学表达式。通过对系统数学模型的研究可以揭示系统的内在运动规律和系统的动态性能。

数学模型可分为机理模型、统计模型与混合模型。利用计算机对一个系统进行仿真研究时,一般采用系统的数学模型。

2. 系统模型的作用

为了研究、分析、设计和实现一个系统,需要进行各种形式的试(实)验,这些试(实)验一般有两种做法,其一是在已经存在的真实系统上进行;其二是通过构造模型,利用模型试验的方式进行。第二种形式的比重越来越大,其理由如下:

(1) 系统还处于设计阶段时,真实系统尚未建立需要了解未来系统的性能,只能通过对模型的试验来了解;

(2) 在真实系统上进行试验可能会引起破坏或发生故障,如处于运行状态的化工系统、电力系统、火箭系统等;

(3) 系统无法恢复,如经济系统,新政策出台后,经过一段时间才能看出效果,若造成损失已经无法挽回了;

(4) 试验条件无法保证,如多次试验,难以保证每次试验条件相同,或试验时间太长,或费用昂贵。

1.2 系统仿真的概念

1.2.1 仿真的概念

1. 仿真的定义

仿真二字,顾名思义,是指模仿真实事物的意思。

1966年雷诺在专著中给出了仿真的定义,即仿真是在数字计算机上进行试验的数字化技术,它包括数字与逻辑模型的某些模式,这些模型描述某一事件或系统(或者它们的某些部分)在若干周期内的特征。

我们现在所说的仿真有两层含义,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,主要是用硬件全部或部分地模仿某一数据处理系统,以至于模仿的系统能够与被模仿的系统一样接收同样的数据,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,而且英文中都用一个词来代表,因此本书所讨论的仿真概念也就这样泛指。

2. 系统仿真

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如下:

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的,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试验,并借助于专家经验知识、统计数据和信息资料对试验结果进行分析研究,进而做出决策的一门综合性的和试验性的学科。

简单而言,所谓系统仿真就是进行模型试验,它是指通过系统模型的试验去研究一个已经存在的或正在设计中的系统的过程。

3. 仿真的理论基础

系统仿真是建立在相似理论、控制理论(系统理论)和计算机技术基础上的综合性和试验性学科。

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)。

相似性是客观世界的一种普遍现象,它反映了客观世界的特性和共同规律。采用相似技术来建立实际系统的相似模型,这是相似理论在系统仿真中基础作用的根本体现。

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。

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原理为基础的。相似原理指出,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。

为了研究实际系统的动态性能,常常要采用数据相似的原理。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。

4. 仿真系统

仿真系统: 是指实现仿真任务的软件和设备, 包括仿真设备、参与被仿真系统操作的人员或部分被仿真系统组件等。

仿真技术: 是以相似原理、信息技术、系统技术及其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试验研究的一门综合性技术。

仿真技术综合了计算机、网络技术、图形图像技术、多媒体、软件工程、信息处理、自动控制、系统工程等多个高技术领域的知识。

5. 仿真的必要性

系统仿真的必要性主要体现在以下方面。

- 优化设计: 在复杂的系统建立以前, 能够通过改变仿真模型结构和调整参数来优化系统设计, 对系统或系统的某一部分进行性能评价;
- 节省经费: 仿真试验只需要在可重复使用的模型上进行, 所花费的成本远比在实际产品上做试验低;
- 故障诊断: 系统发生故障后, 设法使之重演, 以便判断故障产生的原因;
- 避免危险: 某些试验有危险, 不允许进行, 而仿真试验可以避免危险性;
- 假设预测: 仿真可以预测系统的特性, 也可以预测外部作用对系统的影响;
- 训练系统操作人员;
- 为管理决策和技术决策提供依据。

国际上, 仿真技术在高科技中所处的地位日益提高。在 1992 年美国提出的 22 项国家关键技术中, 仿真技术被列为第 16 项; 在 21 项国防关键技术中, 被列为第 6 项; 甚至把仿真技术作为今后科技发展战略的关键技术动力。北约在 1989 年制定的“欧几里得计划”中, 把仿真技术作为 11 项优先合作发展的项目之一。

在以下情况下可以借助仿真来进行研究:

- 研究复杂系统内部各个子系统之间的关系;
- 当系统的输入、结构或环境发生变化时;
- 了解系统的改进情况;
- 了解不同输入信号对系统的影响, 确定影响系统性能的重要输入参数;
- 在新的设计或政策实际使用前进行验证;
- 检验系统的不同能力, 以提升或扩大其应用范围;
- 仿真实时呈现系统的运行情况;
- 通过仿真进行系统操作的学习与培训;
- 基本上没有额外投入的实验或研究。

在如下这些情况下, 没必要进行仿真:

- 利用常识就可以知道或解决的问题;
- 理论分析可以解决的问题;
- 容易直接进行实验的问题;
- 仿真费用高于实际实验费用的;
- 资源或时间不满足的;
- 系统性能过于复杂的, 如人。

1.2.2 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。

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, 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

实时仿真是指仿真模型时钟 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

超实时仿真是指仿真模型时钟 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

慢实时仿真是指仿真模型时钟 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描述,由于其被控量是连续变化的,所以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 计算机仿真

系统仿真一般有物理仿真和数学仿真之分,而数学仿真就是应用性能相似原理,构成数学模型在计算机上进行实验研究,因此,数学仿真也可以称作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。

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,现在所谓的仿真,主要是指计算机仿真。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。

计算机仿真技术不仅限于系统生产集成后的性能测试试验,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。

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,船舶、飞机、导弹等的研制;而且还被应用于非工程系统,如社会经济、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(IAMCS, International Association for Mathematic and Computer in Simulation)。

1.3 系统仿真的过程与特点

1.3.1 系统仿真的特征

系统仿真(数学仿真)有三个基本要素和三项基本活动。

1. 三个基本要素

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,就构成完整的系统仿真过程。

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。

2. 三项基本活动

(1) 模型建立:通过对系统的观察分析和抽象来建立系统的数学模型,由于忽略了一些次要因素和不可观察的因素,因而得到的是一个简化了的模型。

(2) 模型变换: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。其主要任务是设计算法,并转换为计算机程序,使系统的模型能为计算机接受并能在计算机上运行。由于算法设计和计算机运算存在着误差,系统仿真模型是对于实际系统的二次简化模型。

(3) 仿真实验:是对模型的运行。为了进行仿真实验必须设计合理的实验工作程序,拥有便于系统研究的实验软件。根据实验结果情况,进一步修正系统模型和系统仿真模型。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。

在仿真过程中要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。

1.3.2 系统仿真的过程

系统仿真就是以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,对系统进行实验和研究的一种方法。通常,采用计算机来实现系统仿真的过程主要有以下几个方面。

1. 系统定义

根据仿真目的,了解相关要求,确定所仿真系统的边界与约束条件等。



图 1.3 系统仿真三要素的对应关系

2. 数学建模

根据系统实验知识、仿真目的和实验数据来确定系统数学模型的框架、结构和参数,模型的繁简程度应与仿真目的相匹配,确保模型的有效性和仿真的经济性。

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。描述系统各变量间的静态关系采用静态模型,描述系统各变量间的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。

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、克希霍夫定律、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。

系统的数学模型是系统仿真的主要依据。

3. 仿真建模

根据数学模型的形式、计算机的类型以及仿真目的将数学模型变成适合于计算机处理的形式——仿真模型,建立仿真实验框架,并进行模型变换正确性验证。

原始系统的数学模型,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 z 变换转换为计算机可以处理的模型即可。

4. 模型输入

将仿真模型输入计算机、设定实验(模型运行)条件并进行记录。

5. 模型实验

根据仿真目的在模型上进行实验,即仿真。

6. 结果分析

根据实验要求对结果做分析、整理及文档化。根据分析的结果修正数学模型、仿真模型、仿真程序,以进行新的仿真实验。

1.3.3 系统仿真的特点

系统仿真相对于“优化模型”,“仿真模型”是“运行”而不是“求解”,即给定一组输入和模型特性,运行模型,观察其输出。

系统仿真的好处:

- 在不影响实际系统正常运行的情况下,对新的政策、操作规程、信息流向等进行探索和验证;

- 在不耗费资源的情况下，对新的硬件设计、物理布局、物流系统等进行验证；
- 借助控制时钟，通过压缩或扩展时间，以适应慢速或快速变化的系统；
- 可以了解变量之间的内部关系，以及重要变量对系统性能的影响；
- 通过故障分析，了解系统的运行情况；
- 通过仿真，了解各种“可能情况”下系统的运行情况。

系统仿真的不足：

- 建立模型需要特殊的训练；
- 仿真结果有可能难以解释；
- 仿真建模和分析可能耗时、费力。

总而言之，系统仿真的特点主要有以下几个。

1. 研究方法简单、方便、灵活、多样

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进行参数调整，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，可以模拟各种物理系统，体现了所研究物理系统的多样性。

2. 实验成本低

由于仿真往往是在计算机上模拟现实系统过程的，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，采用仿真实验可节省数亿美元。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，现代核实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，从而可以对制定方案和决策提供定量依据。

3. 实验结果充分

通过仿真研究可以得到有关系统设计大量的、充分的曲线与数据。这一优点也是借助于前面两个优点而得到的。

当然，系统的仿真研究也有它的不足，就是要绝对依赖于系统的数学模型，如果数学模型的描述不够准确或者不够完全，系统的仿真结果就会出现误差或者错误。这在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，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对动力学系统的仿真，虚拟现实技术就是一例。

1. 掌握系统、模型和仿真等概念，了解仿真的特点和意义；
2. 熟悉仿真的流程；
3. 了解仿真的发展趋势。