

光机电一体化技术丛书

光机电系统仿真与 虚拟试验技术

王亚斌 李晓峰 宋荣昌 编著

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



光机电一体化技术丛书

光机电系统仿真与 虚拟试验技术

王亚斌 李晓峰 宋荣昌 编著



机械工业出版社

本书主要介绍了光机电系统建模、仿真及虚拟试验的概念、基本技术、常用的建模与仿真方法及应用实例,以满足读者对该项技术了解与应用的需求。

本书从系统的观点出发,着重讨论光机电系统仿真与虚拟试验的基本理论、数学建模、仿真以及相关的关键技术,反映了该技术领域的新发展和新成果,可供在光机电一体化技术领域从事教学、设计、制造、使用的工程技术人员及大专院校有关专业的本科生和研究生研究、学习和参考。

图书在版编目(CIP)数据

光机电系统仿真与虚拟试验技术/王亚斌等编著. —北京:机械工业出版社, 2009. 10

(光机电一体化技术丛书)

ISBN 978-7-111-28153-5

I. 光… II. 王… III. ①光电技术-机电一体化-系统仿真②虚拟技术-应用-光电技术-机电一体化 IV. TH-39

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第151287号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:舒雯 责任编辑:舒雯

版式设计:张世琴 责任校对:刘怡丹

封面设计:姚毅 责任印制:洪汉军

三河市国英印务有限公司印刷

2010年1月第1版第1次印刷

169mm×239mm·17印张·327千字

0001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-28153-5

定价:28.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010) 68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010) 88379649

读者服务部:(010) 68993821

封面无防伪标均为盗版

“光机电一体化技术丛书”编委会

主任：李科杰

委员：（按姓氏笔画排列）

王军政 刘明杰 张文栋 范宁军
罗庆生 郑 链 高学山 黄 强

丛 书 序

随着科学技术的快速发展，光机电一体化技术应运而生。光机电一体化技术是机械技术、光电技术、电子技术以及计算机技术等群体技术的综合运用，光机电一体化技术涉及机械制造、交通、家电、仪器仪表、医疗、玩具娱乐等众多行业，在工业和经济发展中有着重要的地位。信息、生物、空间、海洋、新材料、新能源等高科技领域，国防装备的信息化、现代化及传统产业的改造都离不开光机电一体化技术的发展。

光机电一体化技术发展迅速，其中各项技术正从原来的技术体系分离出来，具有较强的系统特色和相对独立的研究和应用领域。随着微电子技术和微系统技术的发展，光机电一体化技术的应用与发展进入了一个全新的阶段。机电产品和光机电产品成为家电、医疗器材、玩具等产业的主要产品；光机电一体化技术对于工业设备改造、提高制造装备精度和效率起到了重要的作用；光机电一体化技术在航空航天、国防、智能机器人研制等凸现国家综合实力的科研领域中更是地位突出。

相比而言，目前图书市场上光机电一体化技术方面的图书还是比较少的。在机械工业出版社的组织下，由北京理工大学和中北大学（原华北工学院）的老师们合作编写了这套“光机电一体化技术”丛书，较全面地介绍了国内外光机电一体化技术的发展和應用，以期能够帮助相关工程技术人员学习和更新光机电一体化技术知识，促进光机电一体化技术的发展。

“光机电一体化技术丛书”以光机电一体化领域各项技术的通用原理、具体应用和设计指导为主要内容，分《光机电一体化系统设计》、《光机电一体化系统典型实例》、《控制技术》、《感测技术》、《光机电一体化系统常用机构》、《驱动技术》、《信息识别技术》、《光机电系统仿真与虚拟试验技术》和《微光机电系统技术（MOEMS）》9个分册。

各分册所介绍的技术内容以先进、通用为标准，精心筛选，原理介绍简练准确，具体应用注重结合工程实践经验，使用了大量的图、表和实例，注重加强光机电一体化系统的整体设计和技术协调的理念，各分册均有相应章节深入介绍本技术在系统中的应用和设计实例，以便读者更好地学习、实践和应用，帮助从事单项技术的研发人员快速适应光机电一体化系统的研究开发工作。

丛书力求文字简练、深入浅出、内容精练、重点突出、实用性强，为光机电一体化工程实践提供指导。丛书以光机电一体化领域从事应用和科研开发的中、高级工程技术人员为主要读者对象，也可供大专院校相关专业的学生参考。

由于作者的时间和水平有限，不足之处在所难免，欢迎读者批评指正。

“光机电一体化技术丛书”编委会

前 言

本书是“光机电一体化技术丛书”的一个分册，意在向读者介绍光机电系统建模、仿真及虚拟试验的概念、基本技术、常用方法与应用实例。

本书共分9章。第1章介绍了光机电系统仿真与虚拟试验的基本概念、发展现状；第2章介绍了光机电系统建模技术的概念、分类及模型可信性评估原则和模块化建模方法；第3章介绍了面向对象的仿真原理和方法；第4章介绍了图形动画技术在仿真中的应用；第5章介绍了多媒体仿真和虚拟现实的概念及目前开发虚拟现实的主要工具软件；第6章通过实例介绍了机械系统建模的基本过程；第7章通过实例介绍了计算机辅助分析工程技术在仿真中的具体应用；第8章介绍了SPICE电路仿真的基本原理和方法；第9章介绍了VHDL数字电路设计和仿真的实现。

编写本书的主要目的是为了使读者获得光机电系统仿真与虚拟试验的相关知识，为进一步深入研究奠定基础。因此，本书的主要读者对象是在光机电一体化技术领域从事教学、设计、制造、使用的工程技术人员及大专院校有关专业的本科生和研究生。

最后向本书所引用的论文、图表和书籍的作者致以深切的谢意。由于编者水平有限，不足之处在所难免，恳请专家与读者批评指正。

编 者

目 录

丛书序

前言

第 1 章 计算机仿真与虚拟技术 … 1

1.1 系统与系统仿真 …… 1

1.2 系统仿真的发展 …… 2

1.3 系统仿真的分类 …… 3

1.4 系统仿真的基本方法与理论 …… 4

1.4.1 系统仿真与模型 …… 4

1.4.2 系统仿真方法与过程 …… 5

1.4.3 系统仿真的可信性评估 …… 6

1.5 系统仿真的优缺点 …… 8

第 2 章 建模方法 …… 9

2.1 数学模型的作用及形式 …… 9

2.1.1 数学模型的基本概念 …… 10

2.1.2 数学模型的形式 …… 11

2.1.3 系统描述的三种水平 …… 13

2.2 特定的模型形式 …… 14

2.2.1 定义 …… 14

2.2.2 连续系统的模型形式 …… 14

2.2.3 离散事件系统的模型形式 …… 15

2.2.4 系统研究中的基本假设 …… 19

2.3 建模的信息源和途径 …… 19

2.3.1 建模信息源 …… 19

2.3.2 建模途径 …… 20

2.3.3 模型可信性 …… 21

2.3.4 建模过程的总体描述 …… 23

2.4 模块化建模 …… 24

2.4.1 模块化建模方法的发展 …… 25

2.4.2 模块化建模的数学描述 …… 25

2.4.3 模块划分的原则 …… 26

2.4.4 模块建模实例 …… 26

第 3 章 面向对象的仿真 …… 29

3.1 面向对象方法学 …… 29

3.2 面向对象的技术 …… 33

3.2.1 面向对象的基本概念和特征 …… 33

3.2.2 面向对象的分析 …… 38

3.2.3 面向对象的设计 …… 41

3.3 面向对象的仿真 …… 44

3.3.1 面向对象仿真的优点及其应用 …… 44

3.3.2 面向对象仿真的设计语言 …… 45

第 4 章 仿真技术中的图形应用 …… 50

4.1 图形技术在系统仿真中的应用 …… 50

4.2 图形建模 …… 54

4.3 动画仿真 …… 55

4.3.1 动画仿真的作用 …… 56

4.3.2 动画仿真的局限性 …… 58

4.4 动画仿真的实现 …… 58

4.4.1 动画仿真的分类 …… 58

4.4.2 动画仿真的层次性 …… 65

4.4.3 实时动画仿真的关键技术	66	6.2.1 Autodesk Inventor 软件简介	104
4.5 动画仿真的发展趋势	68	6.2.2 机械基本单元的设计	105
4.5.1 计算机图形学基础研究的发展趋向	68	6.2.3 机械系统的装配	119
4.5.2 动画仿真应用的发展方向	70	6.2.4 机械系统工程图的创建	121
第5章 多媒体、虚拟现实仿真	72	6.3 Inventor 三维建模实例	125
5.1 多媒体仿真技术	72	第7章 计算机辅助工程分析技术	132
5.1.1 多媒体的概念	72	7.1 刚体动力学和运动学分析软件 MSC. VisualNastran Desktop 简介	134
5.1.2 仿真与多媒体、虚拟现实的关系	72	7.2 MSC. Visual Nastran Desktop 分析过程	137
5.1.3 多媒体仿真的研究方法	73	7.2.1 建模的建立和预处理	137
5.2 虚拟现实技术	74	7.2.2 仿真试验及结果输出	147
5.2.1 虚拟现实系统的特性	75	7.3 有限元分析软件 ANSYS 简介	150
5.2.2 虚拟现实系统的软硬件支持和系统组成	76	7.3.1 ANSYS 分析基本过程	151
5.3 虚拟现实建模	77	7.3.2 结构静力分析	152
5.4 虚拟现实仿真	86	7.3.3 结构动力学分析	153
5.4.1 基于 Vega 的虚拟现实仿真	86	7.3.4 结构非线性分析	153
5.4.2 基于 OpenGL 的虚拟现实仿真	90	7.4 MSC. VisualNastran For Desktop 活塞机构动力学仿真实例	159
5.4.3 OpenGL 与 Vega 的比较	92	第8章 SPICE 电路仿真方法	166
第6章 机械系统建模	94	8.1 电路仿真概述	166
6.1 机械系统几何平面模型的建立	98	8.2 SPICE 概述	166
6.1.1 二维平面图形绘制	98	8.3 PSpice 电路建模方法	168
6.1.2 图形编辑	99	8.3.1 PSpice 电路建模的基本要素	169
6.1.3 辅助绘图功能	101	8.3.2 PSpice 常用元器件	170
6.1.4 图形注释和标注	102	8.3.3 PSpice 常用信号源	179
6.2 机械系统三维模型的建立	103	8.3.4 PSpice 电路分析与控	

制操作	184	型和运算操作	228
8.4 PSpice 软件介绍	194	9.3.4 VHDL 语言构造体的描述方式	234
8.4.1 OrCAD 的 Capture 模块与原理图绘制	194	9.3.5 VHDL 语言的主要描述语句	236
8.4.2 OrCAD 的 PSpice 模块与电路仿真	198	9.4 VHDL 数字电路设计实例	242
第9章 VHDL 数字电路设计与仿真	217	9.5 VHDL 仿真工具与方法	244
9.1 数字电路系统设计与仿真概述	217	9.5.1 在 ModelSim 中建立仿真项目	246
9.2 硬件描述语言的特点	218	9.5.2 用 ModelSim 进行简单 VHDL 仿真	248
9.3 VHDL 数字电路设计方法	220	9.5.3 用 ModelSim 对 VHDL 设计进行调试	253
9.3.1 库、包和配置	220	参考文献	258
9.3.2 实体	224		
9.3.3 VHDL 中使用的数据类			

第 1 章 计算机仿真与虚拟技术

现实世界是复杂事物的集合，按事物发展的固有规律，复杂事物间的相互联系构成复杂的子系统，子系统之间的相互联系构成整个外在世界的系统。实体、属性和活动构成的系统的三要素，是研究系统规律的切入点。将现实世界抽象化、模型化，产生了系统仿真的理论方法。

进入计算机信息技术时代，系统仿真逐步发展为采用混合计算机、数字计算机和全数字并行处理机的仿真，应用领域也随之更加广泛。至今，数字计算机已成为系统仿真的主要工具。多数情况下，系统仿真即指采用数字计算机仿真。

1.1 系统与系统仿真

系统是一个经常出现在各种场合的词汇，系统可以用来描述各方面的事物。

按照事物联系的广泛性，任何事物都不是相互割裂的，系统一般指一个内部联系比较紧密，与其他事物相对独立的系统。正因如此，系统的涵义是很广泛的，要给其精确地下一个定义不太容易。一般说来，系统是指相互联系又相互作用着的对象的有机集合，它对外呈现出一定的特性或行为，或者能够实现一定的功能。

根据系统的物理特征，可将系统粗略地分成两大类：工程系统（如电气、机械、机电、化工、热力等）及非工程系统（如经济、交通、管理、生态等）。尽管这两类系统的物理本质截然不同，但是有几点是相同的：

- 1) 它们都由一些相互关联的实体组合而成；
- 2) 组成系统的实体具有一定的特征，也具有一定的属性；
- 3) 系统由于各种原因会发生变动，一般把系统内部发生的变化过程称为“活动”；
- 4) 系统对外界呈现出一定的特性，这种特性不是实体属性的简单相加。

虽然系统形形色色，但是它总是由一些实体组成的，每个实体有一些主要的属性，整个系统有它自己的主要活动。因此，实体、属性与活动就构成了系统的三大要素。

为了研究、分析与设计系统，需要对这些系统进行试验测试。有两种试验的方案：一种是直接在真实系统上进行；另一种则是按真实系统本身或预期设计构造一个模型，在模型上进行。由于种种原因而不能直接在真实系统上做试验，则

可以采取第二种方案。实际上，第二种方案在很多情况下是一种最佳的选择，而不是无奈的替代品。在模型上做试验成为对系统进行分析、研究的十分有效的手段，这就是对系统的仿真。

仿真一词译自英文 Simulation，另一个曾用的译名是模拟。1961年，G. W. Morgenthler 首次对仿真一词作了技术性的解释，认为仿真意指在实际系统尚不存在的情况下对于系统或活动本质的复现。近40年来，仿真技术的发展使人们对其认识与理解得以深化。

从广义上说，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。目前，工程技术界比较通用的定义是：系统仿真是通过对系统模型的实验，研究一个存在的或设计中的系统。简而言之，系统仿真是对系统动态模型的实验。

1.2 系统仿真的发展

1946年底，一台电子计算机——ENIAC（电子微分分析器）的诞生，开创了系统仿真的新纪元，从此，系统仿真得到了迅猛发展，逐步成为分析研究系统运动行为、系统动态过程和运动规律的一种重要手段和方法。近年来，随着系统科学研究的深入，控制理论、计算机技术、信息处理技术的发展，计算机软件、硬件技术的突破以及各个领域对仿真技术的迫切需求，使得系统仿真技术在解决科学研究、系统设计、生产控制和教学训练等许多方面均取得了引人注目的成就，形成了一门迅速发展的综合性学科。

从20世纪50年代起，系统仿真技术开始应用于军事领域。随着计算机技术的发展及其应用水平的提高，如果系统具备下列特点，系统仿真技术往往会得到更加广泛的应用。

- 1) 过于复杂以致难以或不可能建立数学模型；
- 2) 具有一个以上相互关联随机变量；
- 3) 动态行为非常复杂；
- 4) 解决系统问题有赖于研究系统一段时间内动态行为。

目前的系统仿真技术所依赖的主要工具是计算机，并发展成为介于运筹学、数理统计和计算机技术之间的一门交叉学科，其利用计算机对系统或过程进行动态模拟，以安全和经济的方法获得刻画系统或过程的特性指标，为决策提供依据。系统仿真是一种对问题求数值解的技术，它对被研究对象的诸要素及其相互作用进行抽象，形成模拟模型，由于仿真模型中引入了描述对象动态过程的“算法”，模型在一定程度上不再受到问题复杂性的限制，因此系统仿真技术通常用来研究随机因素众多、逻辑关系复杂的系统，是经济实用的定量分析方法。

系统仿真技术的实质是建模和进行试验，以研究一个存在的或者设计中的有关问题的方法。系统仿真技术可以充分利用计算机的特点，尽可能多地考虑影响系统动态运作过程的因素（随机的或者动态变化的），建立相对更能反映实际系统运作情况的模型，应用该模型进行模拟试验，可以了解系统中变量之间的相互关系，观察系统中的模拟变量变化的全过程，从而为系统的管理或设计人员提供更为可靠的决策信息。系统仿真技术适用于对难以或不可能建立数学模型的系统问题的研究，因此，随着控制系统、系统工程以及计算机技术的发展，系统仿真技术应用的范围早已由最初的军事和航空航天领域扩大到其他领域。

1.3 系统仿真的分类

仿真的种类多种多样，根据不同的分类标准，可将仿真进行不同的分类。

按仿真对象的模型的不同，可以将系统仿真分为以下几类：①数学仿真，实际系统全部用数学模型来代替，并把数学模型变成仿真模型，在计算机上对实际系统进行研究的过程；②物理仿真，研制某些硬件结构，可重复系统的各种状态；③半实物仿真，就是把数学模型、实体模型和系统的实际设备联系在一起运转，组成仿真系统。

从仿真实现的角度以及系统状态的变化特征来看，可将系统分为连续系统和离散事件系统两大类。连续系统的状态变量是连续变化的，离散事件系统的状态变化只发生在随机时间点上。由于这两类系统固有运动规律的不同，因而描述其运动规律的模型形式就有很大的差别，相应地，系统仿真技术也分为两大类：连续系统仿真和离散事件系统仿真。离散事件系统是指以实体为研究对象，以状态变量为实体性状的特征描述，以事件为驱动状态变量有序转化而形成活动的动因，并以一系列进程复合而成的复杂系统。与离散事件系统相关联的基本概念有实体、事件、活动、状态、进程、仿真钟和队列等。离散事件系统的状态变化特征是随机的，包括状态开始变化的时刻和变化的趋势。这种多因素的随机变化特性，大大增加了用解析方法描述离散事件系统运行机理的难度，因而几乎无法用一个统一的变化函数去描述整个过程。一般只能借助于活动图或流程图分析系统行为的统计性能，而不是行为的点轨迹。同时，离散事件的随机时刻驱动特性决定了系统内部状态的变化是有规律的，即只在随机点上发生状态变迁，而在两个随机点之间，系统内部保持稳态。

系统动态模型的时间标尺可以和实际系统的时间标尺不同，前者受仿真时钟控制，而后者受实际时钟控制，因而也可以根据仿真时钟与实际时钟的比例关系分为：①实时仿真，即仿真时钟与实际时钟完全一致；②欠实时仿真，即仿真时钟比实际时钟慢；③超实时仿真，即仿真时钟比实际时钟快。

还可以根据仿真系统的结构和实现手段不同分为数学仿真、硬件在回路中仿真、软件在回路中仿真和人在回路中仿真；按虚实结合的程度又可分为结构仿真、虚拟仿真和实况仿真等。

1.4 系统仿真的基本方法与理论

仿真技术为研究复杂系统提供了直观有效的系统分析方法，同时为系统设计提供了技术性和经济性的最佳结合点。作为分析、研究各种复杂系统的重要工具，系统仿真广泛应用于工程领域和非工程领域。

为了分析和研究已经存在的或尚未建成的系统，首先建立该系统的模型，并将它放在计算机上进行实验，这一过程就称为仿真。现在系统仿真也可定义为“针对实际系统建立模型，然后在模型上进行试验，用模型代替真实系统，从而研究系统性能的方法”。

从这一定义可以看出，系统仿真有三个基本的活动，即系统建模、仿真建模和仿真实验，联系这三个活动的是系统仿真的三个要素，即系统、模型、计算机，图 1-1 表示了这三个要素的关系。“系统、模型、仿真”三者之间有着密切的关系。系统是研究的对象，模型是系统的抽象，仿真是通过对模型的试验以达到研究系统的目的。

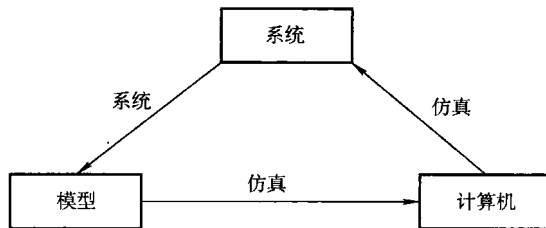


图 1-1 系统仿真三个要素的关系

1.4.1 系统仿真与模型

系统模型是对实际系统的一种抽象，是系统本质的表述。正确建立系统模型，能更深刻、更集中地反映实体的主要特征和运动规律，从而达到对实体的抽象。以数学模型为例，数学模型就是根据物理概念、变化规律、测试结果和经验总结，用数学表达式、逻辑表达式、特性曲线、试验数据等来描述某一系统的表现形式。

系统仿真的基础是建立在模型上的，因此如何获得实际系统的模型是对实际系统进行仿真的一个重要环节。建模从实际开始，通过对仿真实体的分析，借助于方程或其他基本关系得出概念模型。

建模的原则首先要符合客观事物的规律，模型要能正确反映和描述客观事物，根据仿真的目的和内容，模型的描述可选择恰当的复杂程度，总之，仿真模型要尽可能地复现真实对象。常用的建模方法大致有以下几类：

(1) 机理建模方法 这种方法就是根据实际系统工作的物理过程的机理，在某种假定条件下，按照相应的理论，写出代表其物理过程的方程，结合其边界条件与初始条件，再采用适当的数学处理方法，来得到能够正确反映对象动静态特性的数学模型。

机理建模方法是最基本的建模方法，广泛应用于航空、航天等各个领域。

(2) 辨识建模方法 这种方法就是采用系统辨识技术，根据系统实际运行或试验过程中所取得的输入/输出数据，利用各种辨识算法来建立系统的动静态数学模型。这是一个从特殊到一般的过程，是基于系统的实验和运行数据建立系统模型的方法，这种方法又称为归纳法或实验建模法。

(3) 综合建模方法 通常情况下，对于那些内部结构和特性有些了解但又不十分清楚的系统，则只有采用综合建模方法，即机理法、辨识法以及其他一些方法。

除以上三种常用的建模方法外，还有模糊建模方法、神经网络建模方法、模糊神经网络建模方法等多种先进的建模方法。要获得一个满意的模型是十分不易的，特别是在建模阶段，它会受到客观因素和建模者主观意志的影响，所以必须对所建立的模型进行反复检验。

在仿真建模中，系统模型具有以下一些性质：

(1) 相似性 相似性是建模的理论基础之一，模型和真实系统之间应该具有相似的特性和变化规律。这里的相似主要是指所研究对象本质上的相似，为不同目的而建立的模型对相似性的要求是不同的。

(2) 抽象性 建模时总要忽略一些次要的因素。任何模型都是对实际系统的抽象，只是建模的目的和要求不同，对现实世界的抽象程度也不同。

(3) 多面性 任何模型都不可能也没有必要面面俱到地描述一个系统。由于建模的目的不同，对实际系统的关注点也不同，从而可以建立一个系统的不同层次、不同侧面的模型。

总之，在系统建模中要抓住问题的本质和主要矛盾，可以有选择地忽略一些非关键性因素，同时要避免引入结构误差，结合模型描述的层次和特点，选择合理的表示形式，使建立的模型准确、高效。

1.4.2 系统仿真方法与过程

系统仿真过程就是建立系统模型并通过在计算机上运行来对模型进行检验和修正，使模型不断趋于完善的过程。一般来说，系统仿真的基本步骤有：

(1) 系统定义 在求解问题之前要详细地定义系统, 搞清被模拟系统的内容, 判别问题的性质; 明确系统仿真的目的和任务, 提出描述系统目的及其达到目标的衡量标准; 描述系统的约束条件、确定研究的范围, 即确定哪些实体属于所研究的系统, 哪些属于系统的环境。在这一过程中, 仿真者需要通过调研, 对系统有一个全面、深入的了解, 以期能够对系统进行尽可能详细的描述, 明确仿真的目标和系统设计的范围。

(2) 构造模型 按照系统结构及实体之间的逻辑关系, 建立所研究系统的数学、逻辑模型, 这是预测实体未来行为与状态变化的智力结构和数量化方法。构造模型时要把真实系统缩小抽象, 使其规范化, 必须确定模型的要素、变量和参数以及它们之间的关系, 在一定的约束条件下用数学模型描述所研究的系统, 通过模型对系统进行研究、分析和说明, 揭示出实体系统已表现及尚未表现的状态变量之间的复杂关系, 为决策提供一个综合分析的结构, 寻找最佳方案。模型必须和研究目的紧密相连, 有明确的目标和要求, 模型既要忠实真实系统, 又要尽量简单明了, 容易控制和操作, 易于为用户所理解, 并且便于修正和改进。

(3) 仿真数据准备 仿真数据准备包括收集和处理数据以及决定在模型中如何使用这些数据。收集数据是系统研究的重要组成部分, 必须收集所研究系统的输入、输出各项数据以及描述系统各部分之间关系的数据, 通过对数据的分析和统计检验, 确定模型中随机变量的概率分布或概率密度函数以及实体间的数学逻辑关系式的各项参数。

(4) 模型转换 模型转换是指用计算机高级语言、专用仿真语言来描述数学模型, 以便于用计算机运行模型来仿真被研究的系统。模型是用程序设计语言编制的计算机程序, 程序编制出来以后, 应进行调试性模拟运行, 以检验数学模型到逻辑模型的转换是否反映实际系统的本质, 必要时应修改模型和调整计算机程序。

(5) 运行仿真并对结果进行分析 启动仿真程序运行仿真, 获得仿真结果, 并不意味着系统仿真工作的结束。由于仿真技术中包括某些主观的方法, 如抽象化、直观感觉和设想等, 因此必须对仿真结果作全面的分析和论证, 它包括两方面的工作: 一是通过计算置信区间等分析仿真结果的统计特性, 检验仿真试验中获得的信息是否充分, 必要时改变模型结构或参数, 确保仿真结果的可靠性; 二是仿真数据精炼、归纳, 依据给定的目标选择较优方案, 做出结论, 向决策者提出建议辅助决策。

1.4.3 系统仿真的可信性评估

系统仿真是基于模型的实验而非真实系统本身, 仿真过程和结论不能完全精确地代表真实系统的情况。因此对任何仿真都必须进行评估, 只有被科学的评估

证明有效的仿真才是有意义的。在系统仿真中，可信性评估是所有评估的核心。

仿真的可信度是仿真系统的使用者对应用仿真系统在一定环境、一定条件下仿真实验的结果和解决所定义问题正确性的相信程度。评估系统仿真可信度的过程称为系统仿真的可信度评估。

系统仿真可信度具有如下的性质：

(1) 目的相关性 仿真可信度的高低直接与仿真系统的目的紧密相关。即使是对同一个仿真系统，进行系统仿真目的不同，系统所表现的可信度也不同，如果抛开仿真目的，可信度是没有任何意义的。

(2) 客观性 系统仿真可信度具有确定性和无偏见性，它不以系统使用者的态度和所使用的评估方法等主观因素为转移。

(3) 综合性 系统仿真可信度是仿真模型、模型实现算法等多种因素的综合，反映仿真可信度的某个侧面可能受多种因素影响，同样某一种因素也可能影响可信度的某个侧面。例如车辆仿真系统中，地形数据的准确性不仅会影响视景中的遮挡关系，还会影响车辆行进的地形匹配。

需要注意的是，仿真的可信度受到仿真系统所处的外界环境因素的限制，仿真系统不可能反映整个真实世界（或人脑中构想的世界），其反映的只能是真实世界的一部分，在仿真系统中体现的真实世界（或人脑中构想的世界）就构成了仿真系统所处的环境。另外，仿真系统的输入是有一定条件限制的，仿真结果是在满足一定条件的仿真系统输入下得到的仿真系统的输出结果，在讨论仿真可信度问题时，必须指明系统仿真的仿真结果是在什么样的输入条件下获得的。对于同一个仿真系统，不同的输入条件，仿真结果的正确性有可能不同。因此，仿真可信度评估在仿真系统中占有很重要的地位，但是要建立一套完善的可信度评估理论和行之有效的评估方法却并非易事。这主要是以下三大因素导致的。

1) 系统仿真是融合了建模技术、系统科学、软件工程等领域知识的复杂技术。在进行仿真可信度评估时，应充分吸收有关领域的成功方法。但是这些方法绝大部分不是针对仿真可信度评估而直接提出来的，因此，在仿真可信度评估中应用这些方法时，必须充分考虑仿真系统的特点。

2) 复杂系统中研究对象的复杂程度大，并且不确定性因素多。这些仿真系统需要采取更为有效的方法和各方法之间有效配合进行可信度评估。

3) 系统仿真中不断应用信息领域中的新技术，包括面向对象技术、人工智能技术、模糊技术、网络技术等等。这在增强仿真系统功能和性能的同时，也增加了仿真可信度评估难度。

了解了系统仿真可信性评估的原理，有利于使用者在进行仿真中对仿真结果进行正确评价，从而充分、合理地发挥系统仿真的作用。