



辽宁工程技术大学“十五”规划教材

结构仿真分析 ——ANSYS应用

苏荣华 梁 冰 编著



NEUPRESS
东北大学出版社

© 苏荣华 梁 冰 2005

图书在版编目 (CIP) 数据

结构仿真分析——ANSYS 应用 / 苏荣华, 梁冰编著. — 沈阳: 东北大学出版社, 2005.11

ISBN 7-81102-214-1

I. 结… II. ①苏… ②梁… III. 结构力学—计算机仿真—应用软件, ANSYS
IV. O342-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 138130 号

内容简介

本书分为基础知识和实例分析两篇。基础知识篇介绍了仿真的基本概念、仿真技术的应用与发展方向以及结构仿真分析软件 ANSYS 的基本功能, 结合实例对其基本操作方法进行了说明。实例分析篇中, 对如何应用 ANSYS 仿真分析软件对结构力学性能进行仿真分析的过程和步骤进行了较为详尽的介绍, 包括线性静力分析、非线性分析、动力学分析、热力学分析中结构几何模型创建、有限元模型生成、材料属性的设置、载荷的施加方法和问题求解以及后处理检查分析结果等内容; 作为 ANSYS 高级技术应用, 结合实例对 ANSYS 结构优化设计和可靠性分析过程进行了简要介绍。

本书可作为理工科高等院校相关专业的高年级本科生、研究生及教师应用 ANSYS 程序进行结构仿真分析的入门教材, 也可作为从事机械制造、造船、航天航空、汽车交通、土木工程、水利、日用家电等专业的科研人员和工程技术人员利用 ANSYS 进行计算机辅助设计分析的参考书。

出 版 者: 东北大学出版社

地址: 沈阳市和平区文化路 3 号巷 11 号

邮编: 110004

电话: 024—83687331 (市场部) 83680267 (社务室)

传真: 024—83680180 (市场部) 83680265 (社务室)

E-mail: neuph @ neupress.com

http: // www. neupress. com

印 刷 者: 沈阳农业大学印刷厂

发 行 者: 东北大学出版社

幅面尺寸: 184mm × 260mm

印 张: 22

字 数: 580 千字

出版时间: 2005 年 11 月第 1 版

印刷时间: 2005 年 11 月第 1 次印刷

责任编辑: 张德喜

责任校对: 张淑萍

封面设计: 唐敏智

责任出版: 杨华宁

定 价: 29.50 元

序

教材建设是整个教育工作中不可缺少的重要组成部分。邓小平同志曾指出，“教材很重要”，“编好教材是提高教学的关键”。教材建设工作已纳入了教育的整体规划，“九五”国内高校教材建设工作已经取得了重大成就。

我们必须深刻认识到，全面推进素质教育是深化我国教育改革的必由之路。21世纪世界各国经济、军事和综合国力的竞争，归根结底是科技与人才的竞争。因此，培养高素质的专业技术人才和管理人才是摆在我们面前的重要战略任务，也是我国高等教育事业肩负的光荣历史使命。目前，我校和全国其他高校一样，都面临着从应试教育向素质教育的转变，处在全面实施素质教育的理性认识和伟大实践中。

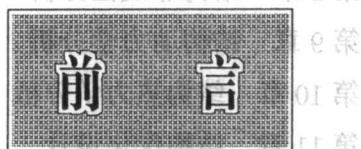
正是站在更新教育观念的认识高度，我们从教材改革入手。诚如徐中玉先生所说：“一种教材可以原封不动用上几十年的日子早已过去，不但几十年不行，几年还是不动也不行了。如果‘凝固’‘保守’也可算作‘稳定’，那么，这种‘稳定’其实是很不足取的，因为它实际乃是‘停滞’的饰词。而‘停滞’就会使我们的一切事业在这日新月异的时代更加落后。”这确是十分中肯的金玉良言！它发人深省，催人思考，促使我们解放思想，与时俱进，迈新步，谱新篇。

为了切实做好教材建设工作，辽宁工程技术大学教材建设委员会在本校各院（系）申报的近百部教材的基础上，组织专家精心论证，审议确定 20 部教材为辽宁工程技术大学“十五”规划教材。各位作者在教材编写中认真研究并吸收了多年来各种版本教材的成功经验，结合本校多年的教学实践经验，并反映当代国内外政治、经济、文化发展优秀成果和科学、技术先进水平。这里，我们衷心祝愿辽宁工程技术大学“十五”规划教材在我校教学中发挥应有的作用，祝愿教材出版后受到学生和读者的欢迎与爱护，使之日臻完善，像美丽的花朵装点我校校园的春天。

最后，对东北大学出版社给予我校教材建设的关心和帮助表示诚挚的谢意。

辽宁工程技术大学教材建设委员会

2004 年 5 月



仿真是通过建立系统模型(数学模型、物理效应模型、数学-物理效应模型)并对所研究的实际或设想的系统进行试验研究的方法或过程。结构仿真分析是以计算机和仿真软件为工具,对结构在载荷作用下的响应行为进行数值模拟,从而给出结构性能的评估和预测的理论和方法。结构仿真分析已经应用于现代工业的各个领域中,在工业产品结构设计、制造和建筑结构设计、建筑过程中都极大地提高了效率和质量。

ANSYS 是一个大型通用的商业有限元分析软件,是世界范围内使用最频繁、应用范围最广的计算机辅助工程(CAE)仿真分析软件之一,能够进行结构、热、流体、电磁以及声学等学科的科学的研究,已经广泛用于核工业、铁道、石油化工、航空航天、机械制造、能源、汽车交通、国防军工、电子、土木工程、造船、生物医学、轻工、地矿、水利,以及日用家电等一般工业及科学研究。ANSYS 软件是第一个通过 ISO 9001 质量认证的大型有限元分析设计软件,成为国际上公认的工程仿真及校验工具。

本书重点介绍了应用 ANSYS 软件进行结构仿真分析的方法和步骤。为便于初学者在较短时间内掌握应用 ANSYS 进行结构仿真分析的方法,书中的实例分析均给出了详细的 GUI 操作方式。

本书以 ANSYS 为软件平台,分为两篇共 12 章。内容安排如下:

基础知识篇 第 1 章 仿真概述

第 2 章 数字计算系统简介

第 3 章 ANSYS 软件基本介绍

第 4 章 ANSYS 前处理

第 5 章 ANSYS 加载和求解

第 6 章 ANSYS 后处理

实例分析篇 第 7 章 结构线性静力分析

第 8 章 结构非线性分析

第 9 章 结构动力学分析

第 10 章 结构热力学分析

第 11 章 结构优化设计

第 12 章 结构可靠度分析

本书是在参考大量有关 ANSYS 的文献资料基础上编著而成。本书由苏荣华、梁冰、裴忠强撰稿。由于作者水平所限，加之时间仓促，疏漏及谬误在所难免，敬请指正。

作 者
2005 年 9 月

目 录

基础知识篇

第1章 仿真概述	1
1.1 概 述	1
1.1.1 仿真的基本概念和定义	1
1.1.2 仿真系统的组成和分类	2
1.1.3 仿真的特点及其优点	3
1.2 系统仿真的过程及步骤	4
1.3 系统仿真的应用	7
1.4 仿真的发展历史及方向	8
1.4.1 发展历程	8
1.4.2 国内外研究现状	9
1.4.3 发展方向	10
第2章 数字计算系统简介	12
2.1 概 述	12
2.2 有限元方法的发展历史	12
2.3 有限元常用术语简介	13
2.4 有限元方法的一般步骤	14
2.5 有限元方法的优缺点	15
2.6 有限元方法的应用	16
2.7 有限元发展方向及重大进展	16
2.7.1 国际上的发展	16
2.7.2 国内发展情况和前景	17
第3章 ANSYS 软件基本介绍	19
3.1 概 述	19
3.1.1 ANSYS 软件的特点和组成	19
3.1.2 ANSYS 软件的功能	21
3.1.3 ANSYS 主要系列产品介绍	23
3.2 ANSYS 启动和退出	24
3.2.1 ANSYS 的启动	24

3.2.2 ANSYS 的退出	25
3.3 ANSYS 用户界面	26
3.4 ANSYS 的文件形式	27
3.5 典型的 ANSYS 分析过程	28
3.5.1 前处理	28
3.5.2 加载求解	29
3.5.3 后处理	29
3.6 引 例	30
3.6.1 问题描述	30
3.6.2 分析过程	30
第 4 章 ANSYS 前处理	46
4.1 环境设置	46
4.1.1 设置工作目录	46
4.1.2 定义工作文件名和分析标题	46
4.2 定义单元类型	46
4.2.1 单元类型简介	46
4.2.2 定义单元类型	49
4.3 定义实常数及材料属性	50
4.3.1 定义实常数	50
4.3.2 定义材料属性	50
4.4 建立几何模型	51
4.4.1 建模方法	51
4.4.2 坐标系和工作平面	52
4.4.3 各种几何元素的建立	54
4.4.4 布尔运算	55
4.5 实例	60
4.5.1 实例一: 轴类零件建模	60
4.5.2 实例二: 支座建模	68
4.6 网格划分	75
4.6.1 网格类型	75
4.6.2 划分网格的方式	76
4.6.3 控制和修改生成的网格	77
4.7 网格划分实例	80
4.7.1 实例一: 轴的网格划分	80
4.7.2 实例二: 支座的网格划分	80
第 5 章 ANSYS 加载和求解	82
5.1 载荷的施加	82
5.1.1 概 述	82
5.1.2 各种载荷的施加	83

5.2 求解	88
5.2.1 载荷步及其相关术语	88
5.2.2 载荷步选项	88
5.2.3 求解	90
第6章 ANSYS 后处理	92
6.1 通用后处理	92
6.1.1 读入结果文件	92
6.1.2 结果显示	92
6.1.3 结果查询	97
6.1.4 单元表	97
6.2 时间历程后处理	98
6.2.1 定义变量	98
6.2.2 存储变量	98
6.2.3 显示结果	98
6.2.4 生成响应谱	98
6.2.5 变量的数学运算	99
6.2.6 变量和数组相互赋值	100
6.2.7 数据平滑	100

实例分析篇

第7章 结构线性静力分析	102
7.1 概述	102
7.2 分析步骤及要点提示	103
7.3 分析实例	105
7.3.1 实例一 平面桁架的静力分析	105
7.3.2 实例二 板的静力分析	111
7.3.3 实例三 梁的静力分析	117
7.3.4 实例四 受函数载荷的轴承的静力分析	121
第8章 结构非线性分析	129
8.1 概述	129
8.1.1 非线性分析的概念及分类	129
8.1.2 非线性分析的特点和注意事项	129
8.2 分析步骤和要点提示	132
8.2.1 前处理和建模	132
8.2.2 加载和求解	132
8.2.3 后处理和检查结果	135

8.3 几何非线性分析	135
8.3.1 大应变分析	135
8.3.2 大应变分析实例	140
8.3.3 屈曲分析	153
8.3.4 屈曲分析实例	159
8.4 材料非线性分析	169
8.4.1 弹塑性概述	170
8.4.2 塑性分析实例	175
8.5 状态非线性分析	185
8.5.1 概 述	185
8.5.2 面-面接触分析	186
8.5.3 点-面接触分析	191
8.5.4 点-点接触分析	195
8.5.5 接触分析实例	199
第9章 结构动力学分析.....	214
9.1 模态分析	215
9.1.1 模态分析概述	215
9.1.2 模态分析的步骤	216
9.1.3 特殊的模态分析	219
9.1.4 模态分析实例	220
9.2 谐响应分析	227
9.2.1 谐响应分析概述	227
9.2.2 Full (完全) 法	228
9.2.3 Reduced (缩减) 法	229
9.2.4 模态叠加法	231
9.2.5 分析实例	232
9.3 瞬态动力学分析	242
9.3.1 概 述	242
9.3.2 Full 法分析步骤	243
9.3.3 Reduced 法分析步骤	244
9.3.4 模态叠加法分析步骤	246
9.3.5 分析实例	248
9.4 谱分析	260
9.4.1 概 述	260
9.4.2 单点响应谱分析步骤	261
9.4.3 随机振动分析步骤	263
9.4.4 多点响应谱分析步骤	264
9.4.5 分析实例——随机振动分析	266

第 10 章 结构热力学分析	287
10.1 概 述.....	287
10.1.1 ANSYS 热分析特点	287
10.1.2 ANSYS 热分析的单元	288
10.1.3 ANSYS 热分析误差估计	289
10.2 稳态传热分析.....	289
10.2.1 稳态热分析的基本步骤.....	289
10.2.2 稳态热分析实例.....	291
10.3 瞬态传热分析.....	295
10.3.1 瞬态热分析的主要步骤.....	295
10.3.2 相变问题.....	297
10.3.3 瞬态热分析实例.....	297
10.4 结构热应力分析.....	303
10.4.1 热应力分析方法.....	303
10.4.2 热应力分析实例.....	304
第 11 章 结构优化设计	307
11.1 优化设计的基本概念.....	307
11.1.1 优化设计概述.....	307
11.1.2 基本概念.....	307
11.2 优化设计的步骤.....	309
11.2.1 生成分析文件.....	309
11.2.2 进行优化分析.....	310
11.2.3 查看优化设计结果.....	312
11.3 三杆桁架的优化设计.....	313
11.3.1 问题描述.....	313
11.3.2 分析步骤.....	314
第 12 章 结构可靠度分析	326
12.1 概 述.....	326
12.2 可靠度分析的步骤.....	326
12.2.1 创建分析文件.....	326
12.2.2 进行可靠度分析.....	326
12.2.3 查看可靠度分析结果.....	328
12.3 可靠度分析实例.....	329
12.3.1 问题描述.....	329
12.3.2 分析步骤.....	329
参考文献.....	340

基础知识篇

第1章 仿真概述

1.1 概述

一个某系统仿真作为各种技术系统工作性能的研究方法,已经渗入到几乎所有的产品领域。越来越短的产品周期迫使设计和研制在尽可能短的时间内就能够对问题作出快速而可靠的决定,从而找到问题的处理和解决方法。通过仿真分析,工程师们能够很早就作出一个关于产品性能的定性和定量的陈述,从而可以节省乃至免除试验结构和样机以及费时试验的昂贵成本。故此仿真技术在现代化工业及国民经济各个领域中有广泛的应用,仿真技术也得到了长足的发展。

1.1.1 仿真的基本概念和定义

(1) 仿真(simulation)

仿真是通过建立系统模型(数学模型、物理效应模型、数学-物理效应模型)并对所研究的实际或设想的系统进行试验研究的方法或过程。

(2) 系统

系统是一个内涵十分丰富的概念,很难用简要的文字进行准确的定义,这里仅给出其在仿真系统中被普遍接受的概念。

系统是由相互联系、相互制约、相互依存的若干组成部分(要素)结合在一起形成的具有特定功能和作用(运动)规律的有机整体。

任何系统都存在三个方面的研究内容,分别为实体、属性、活动。

实体——组成系统的具体要素(对象);

属性——实体的特性(状态和参数);

活动——要素(对象)随时间推移而发生的状态变化。

(3) 仿真技术

仿真技术就是以相似原理、系统技术、信息技术及其应用领域有关的专业知识为基础建立起来的模型(数学模型、物理效应模型、数学-物理效应模型),以计算机和专用物理效应设备为工具,利用系统模型对实际或设想的系统进行试验研究的一门多学科综合性技术。

(4) 系统仿真

系统仿真以系统理论、形式化理论、随机过程与统计学理论和优化理论为基础,以计算机和仿真软件为工具,对现实系统或未来系统进行动态试验研究的理论和方法。

从其实施过程来看,系统仿真是通过对所研究系统的认识和了解,抽取其中基本要素的关键参数,建立与现实系统相对应的仿真模型,经过模型的确认和仿真程序的验证,在仿真实验设计的基础上,对该模型进行仿真实验,以模仿系统的运行过程,观察系统状态变量随时间变化的动态规律性,并通过数据采集和统计分析,得到被仿真系统参数的统计特性,据此推断和估计系统的真实参数和性能测度,为辅助决策提供依据。

系统仿真对系统进行试验研究的综合性技术学科,是研究系统、解决问题的方法和手段,研究的对象是系统,最终目的是解决系统问题。

(5) 仿真系统

系统仿真的方法和手段的实现,需要一定的环境。我们把建立系统仿真环境,实现系统仿真的各个组成部分(要素)所形成的有机整体称为仿真系统。

1.1.2 仿真系统的组成和分类

(1) 组成

系统仿真是研究系统、解决问题的方法和手段,故此,一个仿真系统的建立是面向某个系统和问题的,仿真系统的组成规模就取决于所研究的系统问题。一般来说,面向问题的仿真系统由四个部分组成,分别为:仿真系统软件、仿真系统硬件、仿真系统的评估、仿真系统的校验验证与确认。

① 仿真系统软件。它包括系统模型软件、通用软件、专用软件(或应用软件)和数据库。系统模型软件一般由被仿真系统对象数学模型、仿真算法、系统运行流程等组成。通用软件含有计算机操作系统、编程语言、调试运行环境、图形界面开发程序、通用接口通信程序、数据采集与显示等。专用软件包含专用算法和专用接口通信程序。数据库包括数据库开发系统和建立的各种信息数据库。

② 仿真系统硬件。可分为仿真计算机、接口、连接电缆、非标设备、信号产生与激励设备、数据采集与记录显示设备、通信指挥监控设备、能源动力系统、系统测试设备及各类辅助设备。

③ 仿真系统的评估。分为软件评估和硬件评估。软件包括评估方法、程序、指标测试方法等;硬件主要是评估测试设备。仿真系统的评估内容主要包括仿真系统及分系统(设备)的指标测试评估,系统的可信性、可靠性、安全性、可维护性等的评估。

④ 仿真系统的校验验证与确认。一般对建立的仿真系统进行评估之后,还要进行系统仿真试验设计与协调,确定仿真试验过程,通过大系统的仿真试验对仿真系统进行全面考核,以确定仿真系统是否能满足系统仿真试验要求,是否能够达到系统仿真试验目的并具有足够的可信度。这部分内容主要以软件工作为主,采用定性与定量的分析。仿真系统经过验证与确认后,由设备管理部门发放合格证,正式投入运行。

(2) 分类

仿真系统有多种分类方法,依据不同的分类标准,仿真系统可进行不同的分类。

按实现方法可分为数字仿真(计算机仿真)、半实物仿真(硬件在回路的仿真)、物理仿真(全实物仿真)系统。数字仿真即计算机仿真,是利用系统数学模型在计算机上进行仿真试验的方法。半实物仿真是在进行系统仿真试验时,将一部分实物接入仿真试验回路,用计算

机和物理效应设备实现系统模型的方法。物理仿真是系统模型全部采用物理效应模型进行系统仿真试验的方法,这种方法要求物理效应模型与系统原型有相似的物理属性。

按系统组成规模可分为大、中、小型仿真系统。

按半实物仿真系统的物理性质可分为射频制导、光学制导、水声制导、惯性制导仿真。它们可以细分为微波、毫米波、可见光、红外、紫外制导等仿真系统,按武器系统的组成规模可分为单武器平台仿真系统和多武器平台仿真系统。

根据系统仿真技术服务的对象领域的不同又可分为航空航天仿真系统、核电站仿真系统、化工仿真系统、交通仿真系统、水利仿真系统等。

1.1.3 仿真的特点及其优点

(1) 特点

近几年,以计算机技术、通讯技术与传感技术为主导的信息技术的飞快发展,为仿真技术的发展进入一个崭新的环境打下了良好基础。仿真技术的发展将出现新概念、新应用和新的地位。由目前发展情况分析,有如下值得注意的特点。

① 仿真技术是一门独立的学科,但它离不开计算机技术。只要计算机技术在飞快地发展,仿真技术就一定随之快速发展。

② 仿真技术作为信息技术族内的成员,它不仅自身发展快,而且与信息技术各项发展结合也快,它们永远面对新问题、组织新技术、形成新的系统工程。因此,仿真技术是不断研究新现象、分析新规律、揭示相关系统、找出解决方法的强有力工具。

③ 在知识经济来临、知识管理的形成和发展中,仿真技术是最好的工具。它将被更多人了解和掌握。美国很多大公司开始用“代理人软件”代替人类做多种经营工作。预计类同“仿真脑”系列的产品将会被成批生产,用以代替人们进行管理和决策。

④ 仿真技术的应用领域越来越广,在信息技术发展中,它将占据独特的地位。

⑤ 目前,在全世界软件产业快速进展的环境中,仿真支撑软件、各种工具软件(包括专用仿真语言),乃至通用的应用软件商品化的周期缩短。

⑥ 面向对象的技术和应用发展较快,一方面推动仿真概念变化,另一方面适应复杂、非线性应用的能力增大。

⑦ 由于网络技术的发展,为异地、异国应用提供了可能,将对仿真技术提出新的挑战,也推动了发展。预计仿真技术和网络技术的结合,将出现新的概念,并扩大应用范围。

⑧ 仿真技术在培训领域中已有了丰硕的成果。比如核电站、飞机的仿真机等都是培训所必需的仿真系统产品。

(2) 优点

系统仿真是运筹学的一个重要分支,它与线性规划和网络技术一起被称为运筹学在应用领域中的三大支柱。在求解复杂系统中,系统仿真具有不可忽视的优越性。

① 系统仿真技术已成为继理论分析和实物实验之后,认识客观世界规律性的新型手段,它可以将研制过程、运行过程和实施过程放在实验室中进行,具有良好的可控性、无破坏性、可复现性和经济性等特点。

② 系统仿真在理论上体现了实验思考的方法论。用它可以探索高技术领域和复杂系统深层次的运动机理和规律性,给出人们直观逻辑推理不能预见的系统动态特征,具有科学的先验性。

③ 对于包含多种随机性的复杂系统,通常难以用数学模型或解析方法作精确的描述和求解。系统仿真则可根据系统内部的逻辑关系和数学关系,面向系统的实际过程和行为来构造仿真模型,在很少假设或不假设的前提下建立包括系统主要因素和具体细节的模型框架,并通过仿真实验运行,得到复杂系统的解。因而被称为科学技术领域“最后的方法”。

④ 系统仿真建模具有面向过程的特点,仿真模型与所研究系统的运行过程在形式上和逻辑上存在对应性,避免了建立抽象数学模型的困难,显著简化了建模过程,具有直观性,使广大科技人员和管理、决策人员都能成为系统仿真的直接使用者。

⑤ 随着系统仿真理论和计算机技术的发展,系统仿真已跻身于高新技术领域,使系统仿真与人工智能技术、并行处理技术、分布式仿真、优化理论、三维图像处理技术以及多媒体技术等融为一体,并逐步步入虚拟现实仿真、互联网上仿真以及群决策仿真研讨厅等领域。目前已列入我国国家和国防关键技术发展计划。

鉴于以上的优点,系统仿真已在工业生产、交通运输、能源供应、医疗卫生、航空航天、军事作战、制造过程以及社会服务等领域得到广泛的应用。在各行各业中,应用于生产运行管理、设计方案论证、企业诊断、高层次决策分析、投资风险、谈判策略等方面,具有巨大的应用潜力。

1.2 系统仿真的过程及步骤

系统仿真的建模求解与其他建模方法论的不同点主要在于其建模的不唯一性和求解过程的实验性。因此,系统仿真必须遵循一定的步骤,才能保证建模的有效性和仿真运行结果的正确性。现分别对各个步骤加以介绍。

(1) 问题阐述和目标设定

每项仿真研究都应从所研究系统的说明开始,只有对该系统具有深入的了解,明确需要解决的问题和应达到的目标,并且在这些问题上与决策者取得一致意见,才能为仿真建模与仿真运行提供可靠的基础。所谓仿真建模的目标是指通过仿真能够回答的问题,因此在问题阐述阶段中,必须首先对应应用系统仿真是否能够回答这个问题和达到预定目标作出判断。如果确实可行,通常还需要制定一种非仿真建模的方案,以便于对不同方法所得到的结果进行比较,验证仿真模型的正确性和经济性。

在确定一致认可的目标以后,还需要描述这些目标的主要环节和状态变量,明确定义所研究问题的范围和边界,凡是与目标和主要状态变量密切相关的环节,都应包含在仿真模型之中,那些与仿真目标或状态变量无关或影响不大的环节,则应排除在外或作为仿真的外部环境加以考虑。此外,还应规定仿真的初始条件,并充分估计初始条件对系统主要性能的影响。

(2) 仿真模型的建立

仿真模型是对所研究系统运行过程的一种抽象描述并能反映系统的性质属性。

仿真建模具有本身所固有的特点,通常仿真建模是面向问题和运行过程的建模方式。在离散系统仿真的建模中,主要应根据随机发生的离散事件,代表系统中所描述主要对象的实体流以及仿真时间的推进机制,按照系统的运行进程来建立模型。对于连续系统的仿真建模,则主要根据系统内部各个环节之间的因果关系,系统运行的流程,按一定方式建立相应的状态方程——差分方程或微分方程——来进行仿真建模。对于混合系统而言,则既需

要针对连续变量建立相应的状态方程,同时,也要在模型中设定相应的随机离散事件和相应的动态实体流。特别是在出现离散事件和连续变量达到阈值时,状态变量的跃变过程。通常,在混合仿真中均采用固定步长的时间推进机制,以适应离散、连续两类变量的要求。

应该指出的是,仿真建模尤其是离散系统建模,所给出的仿真模型往往不具有唯一性。对于同一系统中的同一问题,由于仿真建模人员的背景和偏好不同,可能建成迥然不同的仿真模型。不同人员对问题描述的逻辑思维、繁简程度以及模型结构等都可能存在差异,但是它们的运行结果却又可能比较相近或均能满足仿真目标的基本要求。也就是说,存在仿真模型的风格问题。因此,仿真建模在一定程度上是一种“建模艺术”,并不单纯是仿真技术。仿真建模人员由于其艺术风格不同,可以允许建立具有特殊风格的仿真模型,从而带有一定的特色。从本质上说,仿真过程乃是一种科学的实验过程,仿真模型必须经受理论和实践的检验,因而在仿真建模过程中必须有严格的“确认(Validation)和验证(Verification)”环节,以保证建模的科学性。

(3) 进行数据采集

仿真模型给出了系统仿真的框架,在输入正确数据时,仿真运行调动模型内部的逻辑关系和数学关系,进行相应的运算和统计计算,给出准确的仿真输出结果。缺乏正确的输入数据,只能使系统仿真起到相反的作用,造成误导决策的严重后果。

随着系统复杂性和随机性的增强,数据采集在系统仿真中所占的份额也越来越大,从确定仿真目标开始就应进行数据采集工作,包括采集系统仿真初始条件及系统内部变量有关的数据。这些数据往往是服从某种概率分布的随机变量的抽样结果,通常需要大量系统运行的历史数据,或对类似现实系统进行大量实验才能获得。许多输入数据还需经过分布拟合、参数估计以及假设检验等步骤,确定随机变量的概率密度函数或经验分布函数,以便输入仿真模型,实施仿真运行。

(4) 模型的确认

在仿真建模中,所建立的仿真模型能否代表所研究的真实系统,是决定仿真成败的关键。按照统一的标准对仿真模型和代表性进行衡量,这就是仿真模型的确定。目前常用的是三步法确认:第一步由熟知该系统的专家对仿真模型作直观的和内涵的分析评价;第二步是对模型所作的假设、输入数据的合理性进行检验;第三步是对模型作试运行,观察初步仿真结果与真实系统的统计数据是否一致,或改变主要输入变量的数值时,仿真输出变量的变化趋势是否合理。通过以上三个步骤,一般认为仿真模型已得到了确认。但是,仿真模型确认是一个不断修改和完善的过程,在上述各步骤中都可能发现模型中的不合理或错误之处,在确认过程中对模型进行局部或较大的修改是正常现象。从系统仿真的发展过程来看,仿真模型的确认无论从理论上还是方法上都尚未达到完善的程度,是系统仿真今后的重要研究课题之一。

(5) 仿真程序的编制和验证

仿真模型只是系统的一种抽象和运行框架,必须将仿真模型转化成计算机能识别和执行的代码,才能通过计算机进行必要的仿真实验。早期的仿真程序采用通用程序语言进行编程(如 Fortran, Basic 和 Algol 语言等),由于仿真器本身的复杂性和用户对仿真输入/输出数据的苛刻要求,使用通用程序设计语言编程费时、费力,从而使系统仿真只能成为少数程序设计专家涉足的领域,而将广大的科技人员、管理人员和决策人员排除在外。

20 世纪 70 年代以来,随着系统仿真的推广和应用,许多面向事件、面向过程和面向对

象的仿真语言纷纷问世,如面向事件的 SIGMA, GASP 等仿真语言,面向过程的 GPSS/H、SIMSCRIPT/II.5、SLAM/II、SIMAN/V 等,面向对象的 SIMPLE++、SIMULINK 等,明显地方便了用户的编程工作。同时,由于仿真语言均以宏语句形式编程,从而使仿真程序显得紧凑而精练。据统计,对于同样的模型,用仿真语言编程比用通用程序语言编程,程序语句的数目可减少约 70%~80%。

然而,仿真程序的编制过程,完全依靠编程人员对仿真模型的理解,并将这种理解转变成相应的仿真程序。如果这个转变过程存在偏差或错误,则所编制的仿真程序便不能代表经过确认的仿真模型,仿真结果也将失去意义,因此,需要对仿真程序进行验证。

所谓仿真程序的验证,是指对仿真程序的逻辑和数学关系以及输入/输出响应与仿真模型的一致性所进行的测试和检验。通常这种一致性由程序结构和模型要素之间的对应性来保证。但是,在模型规模较大或内部关系比较复杂时,往往需要进行程序的分块调试与验证,使之与模型中对应模块的功能相一致,当改变输入数据时,检验输出端的响应在幅度和方向上的合理性。有时也需要对局部模块进行解析计算,用以验证对应仿真程序块的正确性。最后还需要对完整仿真程序主要变量的输入/输出响应进行测试和验证,使之达到模型确认时所提出的基本指标。这种程序分块验证和整体验证可能需要进行多次反复和调试,才能最终验证仿真程序。

为了便于非仿真专业人员能够有效地应用仿真技术,近年来发展了许多以图形/图标输入方式建模和仿真程序自动生成技术为主流的仿真软件,如以 AutoMod, Promodel, Taylor/II 等为代表的仿真软件,都能提供友好的图形用户界面,并能根据用户输入的图形流程自动生成无错误的仿真程序,从而可免去繁琐的程序编制和调试工作。使广大科技人员、管理人员和决策人员有可能把主要精力用到仿真建模中去,而无需为编制仿真程序而耗费时间。此外,由于程序自动生成器是将模型的逻辑关系和数学关系直接“翻译”成对应的仿真程序,从而无需进行程序验证工作,明显提高了仿真建模的效率。

(6) 仿真模型的运行

在仿真模型已得到确认,仿真程序也经过验证之后,就可以对仿真模型作正式运行。由于仿真模型中往往包含多种随机变量,每次仿真运行仅是对系统运行的一次抽样,应用相同的初始条件和输入数据(包括输入随机变量),作足够多独立的重复仿真运行,才能得到仿真输出响应的统计规律。这种独立的重复仿真运行应采用相互独立的随机数流,以便模拟一种独立的随机抽样过程。在这种情况下可以应用经典统计方法,由仿真输出结果对系统的总体性能作出正确的推断。

此外,进行系统仿真往往需要根据仿真的目的确定主要的决策变量,从大量不同决策变量取值的组合中,找出一种满意的方案,供决策时的参考。由于这种变量组合的数目往往随变量数和变量取值范围的增大呈指数增长关系,为了用最少的仿真次数取得最必需的仿真输出数据,在作仿真运行之前还应作好仿真的实验设计,如 2^k-p 析因设计、正交设计等,以便对决策变量的取值组合进行设计和安排,提高仿真运行的效率。

(7) 仿真输出结果的统计分析

对仿真模型进行多次独立重复运行后,可以得到一系列仿真输出响应和系统性能测度的均值、标准偏差、最大和最小数值、变异系数、观察数等。但是,这些参数也仅是对所研究系统所作仿真实验的一个样本,要估计系统的总体参数及其分布特征,还需要在仿真输出样本的基础上,进行必要的统计分析和统计推断。常用的统计推断方法包括对均值和方差的