

控制科学与工程



国防科工委「十五」规划教材

系统仿真技术

● 彭晓源 主编



北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社

西北工业大学出版社

哈尔滨工业大学出版社

哈尔滨工程大学出版社



国防科工委“十五”规划教材·控制科学与工程

TP391.9

58

2006

系统仿真技术

彭晓源 主编

北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社 西北工业大学出版社

哈尔滨工业大学出版社 哈尔滨工程大学出版社

内容简介

本书介绍系统仿真定义、应用及分类,系统仿真基础知识、名词术语和仿真计算机系统常用的操作系统、编程语言、开发环境及与仿真应用有关的数据库知识。在较系统地讲述系统仿真技术基本概念、一般原理及方法的基础上,重点讲述工程领域中连续系统的建模/仿真方法,包括连续系统数学模型、连续系统仿真数值积分方法、连续系统离散化仿真、随机控制系统仿真;突出实时仿真系统的建模/仿真,包括半实物仿真和人在回路仿真的原理、方法、系统组成与典型系统分析。同时讲述了近年来迅速发展的分布式仿真技术的原理、规范、平台级分布交互仿真系统及其应用。本书对虚拟现实(VR)技术的定义、组成、特点,三维实时图像的建模、显示原理,虚拟空间声音的建模、显示方法,动感、力感反馈原理及实现方法进行了讲述,使读者初步了解虚拟现实技术如何在系统仿真中应用,以及如何去开发各种应用系统。由于仿真可信度是仿真应用的基础,本书就建模/仿真的 VV&A(校核、验证与确认)技术进行了较系统的讲述。最后一章对常用的数学建模/仿真工具 MATLAB 软件包的主要功能、使用方法进行了简介,便于读者进一步学习和应用。

为便于读者学习和掌握本书主要内容,每一章都配有习题。

本书可作为系统仿真科学与技术及其相关学科的本科生教材,还可供相关专业研究生和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

系统仿真技术/彭晓源主编. —北京:北京航空航天大学出版社,2006.12

ISBN 7-81077-922-2

I. 系… II. 彭… III. 系统仿真 IV. TP391.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 124090 号

系统仿真技术

彭晓源 主编

责任编辑 王媛媛

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(100083)

发行部电话:010-82317024 传真:010-82328026

http://www.buaapress.com.cn E-mail:bhpress@263.net

北京时代华都印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:787×960 1/16

印张:17.75 字数:398 千字

2006 年 12 月第 1 版 2006 年 12 月第 1 次印刷

印数:3 000 册

ISBN 7-81077-922-2 定价:26.00 元



总 序

国防科技工业是国家战略性产业,是国防现代化的重要工业和技术基础,也是国民经济发展和科学技术现代化的重要推动力量。半个多世纪以来,在党中央、国务院的正确领导和亲切关怀下,国防科技工业广大干部职工在知识的传承、科技的攀登与时代的洗礼中,取得了举世瞩目的辉煌成就;研制、生产了大量武器装备,满足了我军由单一陆军,发展成为包括空军、海军、第二炮兵和其他技术兵种在内的合成军队的需要,特别是在尖端技术方面,成功地掌握了原子弹、氢弹、洲际导弹、人造卫星和核潜艇技术,使我军拥有了一批克敌制胜的高技术武器装备,使我国成为世界上少数几个独立掌握核技术和外层空间技术的国家之一。国防科技工业沿着独立自主、自力更生的发展道路,建立了专业门类基本齐全,科研、试验、生产手段基本配套的国防科技工业体系,奠定了进行国防现代化建设最重要的物质基础;掌握了大量新技术、新工艺,研制了许多新设备、新材料,以“两弹一星”、“神舟”号载人航天为代表的国防尖端技术,大大提高了国家的科技水平和竞争力,使中国在世界高科技领域占有了一席之地。十一届三中全会以来,伴随着改革开放的伟大实践,国防科技工业适时地实行战略转移,大量军工技术转向民用,为发展国民经济作出了重要贡献。

国防科技工业是知识密集型产业,国防科技工业发展中的一切问题归根到底都是人才问题。50多年来,国防科技工业培养和造就了一支以“两弹一星”元勋为代表的优秀的科技人才队伍,他们具有强烈的爱国主义思想和艰苦奋斗、无私奉献的精神,勇挑重担,敢于攻关,为攀登国防科技高峰进行了创造性劳动,成为推动我国科技进步的重要力量。面向新世纪的机遇与挑战,高等院校在培养国防科技人才,传播国防科技新知识、新思想,攻克国防基础科研和高技术研究难题



当中,具有不可替代的作用。国防科工委高度重视,积极探索,锐意改革,大力推进国防科技教育特别是高等教育事业的发展。

高等院校国防特色专业教材及专著是国防科技人才培养当中重要的知识载体和教学工具,但受种种客观因素的影响,现有的教材与专著整体上已落后于当今国防科技的发展水平,不适应国防现代化的形势要求,对国防科技高层次人才的培养造成了相当不利的影响。为尽快改变这种状况,建立起质量上乘、品种齐全、特点突出、适应当代国防科技发展的国防特色专业教材体系,国防科工委全额资助编写、出版 200 种国防特色专业重点教材和专著。为保证教材及专著的质量,在广泛动员全国相关专业领域的专家、学者竞投编著工作的基础上,以陈懋章、王泽山、陈一坚院士为代表的 100 多位专家、学者,对经各单位精选的近 550 种教材和专著进行了严格的评审,评选出近 200 种教材和学术专著,覆盖航空宇航科学与技术、控制科学与工程、仪器科学与技术、信息与通信技术、电子科学与技术、力学、材料科学与工程、机械工程、电气工程、兵器科学与技术、船舶与海洋工程、动力机械及工程热物理、光学工程、化学工程与技术、核科学与技术等学科领域。一批长期从事国防特色学科教学和科研工作的两院院士、资深专家和一线教师成为编著者,他们分别来自清华大学、北京航空航天大学、北京理工大学、华北工学院、沈阳航空工业学院、哈尔滨工业大学、哈尔滨工程大学、上海交通大学、南京航空航天大学、南京理工大学、苏州大学、华东船舶工业学院、东华理工学院、电子科技大学、西南交通大学、西北工业大学、西安交通大学等,具有较为广泛的代表性。在全面振兴国防科技工业的伟大事业中,国防特色专业重点教材和专著的出版,将为国防科技创新人才的培养起到积极的促进作用。

党的十六大提出,进入 21 世纪,我国进入了全面建设小康社会、加快推进社会主义现代化的新的发展阶段。全面建设小康社会的宏伟目标,对国防科技工业发展提出了新的更高的要求。推动经济与社会发展,提升国防实力,需要造就宏大的人才队伍,而教育是奠基的柱



石。全面振兴国防科技工业必须始终把发展作为第一要务,落实科教兴国和人才强国战略,推动国防科技工业走新型工业化道路,加快国防科技工业科技创新步伐。国防科技工业为有志青年展示才华,实现志向,提供了缤纷的舞台,希望广大青年学子刻苦学习科学文化知识,树立正确的世界观、人生观、价值观,努力担当起振兴国防科技工业、振兴中华的历史重任,创造出无愧于祖国和人民的业绩。祖国的未来无限美好,国防科技工业的明天将再创辉煌。

张华祝



前 言

系统仿真技术是以相似原理、控制理论、计算技术、信息技术及其应用领域的专业技术为基础,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动态试验研究的一门综合性技术。近年来仿真技术广泛应用于国防、军事、能源、交通等工程与非工程领域。在国防工业及科研部门,特别是航空、航天、船舶、兵器等领域,仿真技术贯穿于方案论证、产品设计、试验、生产制造、使用、维护的全生命周期,因此系统仿真技术是一门通用性强、应用面广、发展迅速、跨学科的综合性的技术。

半个多世纪以来,系统仿真技术在各类应用需求的牵引及有关学科技术的推动下,已经发展形成一门综合性的专业技术体系,迅速成为一项通用性、战略性技术,并与高性能计算一起,成为继理论研究和实验研究之后第三种认识、改造客观世界的重要手段。目前,系统仿真技术正向“数字化、虚拟化、网络化、智能化、集成化、协同化”的方向发展。

本书首先讲述系统仿真技术相关定义、应用及分类、系统仿真基础知识、名词术语和仿真中常用的计算机操作系统、编程语言、开发环境及数据库。在较系统地讲述系统仿真技术基本概念、一般原理、方法的基础上,重点讲述工程领域中连续系统的建模方法,突出工程系统实时仿真的建模/仿真原理、方法,并结合国防科研中的应用实例,理论联系实际,促进学生创新意识和科研实践能力的培养。

本书共10章,第1、2章论述系统仿真定义、应用及分类,同时介绍系统仿真基础知识。第3、4、5章讲述连续系统数学模型,包括常用确定性连续系统数学模型、离散时间系统数学模型、随机系统数学模型和对应的三类仿真模型建模及仿真算法,即连续系统仿真数值积分方法、连续系统离散化仿真方法和随机系统数学模型及仿真算法。第6章介绍了随机控制系统的建模、仿真方法。第7章介绍了实时仿真系统的基本概念、分类、组成与原理,论述了分布交互仿真系统的发展过程、模型分类及分布



交互仿真标准、协议、通信机制。第8章介绍了虚拟现实(VR)技术及其在仿真中的应用,三维图像、虚拟声音的建模/仿真方法,触觉/力反馈原理、设备;并介绍了VR技术在仿真系统中的应用,如在仿真器、虚拟样机、虚拟制造、虚拟战场、科普、娱乐中的应用。第9章讲述VV&A技术,包括基本概念、原则、方法及应用。第10章对常用的数学建模/仿真工具MATLAB软件包的主要功能、使用方法进行了介绍。本书内容结合当前仿真科技领域的发展及应用并吸收了北京航空航天大学先进仿真技术航空科技重点实验室和飞行器控制一体化技术国防科技重点实验室多年的研究成果和教材。

本书1、2章由彭晓源研究员编写,3、4、5章由王卫红教授编写,6、7、10章由王江云副教授编写,第8章由冯勤研究员、龚光红教授编写,第9章由刘丽副教授编写。感谢王行仁教授对本书编写的指导。

目 录

第 1 章 绪 论

1.1 系统仿真技术及应用	1
1.1.1 系统仿真技术定义	1
1.1.2 系统仿真技术在复杂产品研制中的应用	4
1.1.3 系统仿真技术在操作人员培训中的应用	6
1.2 仿真分类及任务	8
1.2.1 按被仿真对象性质分类——连续系统仿真和离散事件系统仿真	8
1.2.2 按功能及用途分类——工程仿真和训练仿真	9
1.2.3 按仿真系统体系结构分类——单平台仿真和多平台分布交互仿真	9
1.2.4 按分布仿真中虚实结合程度分类——构造仿真、虚拟仿真、实况仿真	9
1.2.5 按仿真时钟与墙钟时间(自然时间)的比例关系分类——实时仿真、欠实时仿真 和超实时仿真	10
1.2.6 按系统数学模型描述方法分类——定量仿真和定性仿真	10
1.3 工程领域连续系统仿真方法分类及任务	11
1.3.1 数学仿真	11
1.3.2 硬件在回路仿真	11
1.3.3 软件在回路仿真	11
1.3.4 人在回路仿真	12
1.4 现代建模/仿真技术的应用及发展	12
1.4.1 现代建模/仿真技术	12
1.4.2 现代建模/仿真技术体系	13

第 2 章 系统仿真基础知识

2.1 名词术语	16
2.1.1 数学模型	16
2.1.2 仿真模型	16
2.1.3 实时仿真	17
2.1.4 分布交互仿真	17
2.1.5 高层体系结构	17
2.1.6 建模/仿真的校核、验证与确认	18
2.1.7 基于仿真的采办	18
2.1.8 虚拟样机	19
2.1.9 虚拟制造	19



2.1.10 仿真网格	19
2.1.11 虚拟现实技术	20
2.2 操作系统、编程语言/开发环境的比较与选择	20
2.2.1 操作系统	20
2.2.2 编程语言及开发环境	25
2.2.3 面向对象建模方法及统一建模语言(UML)	28
2.3 数据库、模型库	32
2.3.1 仿真系统中常用的数据库及特点	32
2.3.2 仿真系统数据库、模型库的开发、管理及应用	36
习 题	39
参考文献	39

第3章 连续系统数学模型

3.1 引 言	40
3.2 常用确定性连续系统数学模型	40
3.2.1 数学模型	40
3.2.2 数学模型间的转换	41
3.3 离散时间系统数学模型	48
3.3.1 差分方程	48
3.3.2 z 传递函数	48
3.3.3 离散状态空间表达式	48
3.3.4 离散系统结构图	48
3.3.5 关于采样系统	49
3.4 随机系统数学模型	50
3.4.1 连续随机系统描述方法	50
3.4.2 离散随机系统描述方法	50
3.4.3 随机系统建模/仿真中的专门问题	51
习 题	51
参考文献	52

第4章 连续系统仿真的数值积分法

4.1 数值积分法原理	53
4.2 欧拉方法	54
4.2.1 欧拉法	54
4.2.2 改进欧拉法	54
4.2.3 几个基本概念	56
4.3 龙格-库塔法	58
4.3.1 龙格-库塔法的基本原理	58
4.3.2 固定步长的龙格-库塔法	59



4.3.3 龙格-库塔法的稳定区	61
4.3.4 实时龙格-库塔法公式	63
4.3.5 变步长龙格-库塔法	64
4.4 亚当姆斯法	66
4.4.1 亚当姆斯显式公式	66
4.4.2 亚当姆斯隐式公式	67
4.4.3 预估校正公式	68
4.4.4 亚当姆斯法的稳定区	69
4.5 刚性方程的数字仿真	70
4.5.1 刚性方程	70
4.5.2 吉尔法	71
4.5.3 单步多值法的误差估计	75
4.5.4 单步多值法阶与步长的控制	76
4.6 计算方法和计算步长的选择	77
4.6.1 积分方法的选择	77
4.6.2 计算步长的选择	79
习 题	80
参考文献	80

第5章 连续系统的离散化仿真

5.1 替换法	81
5.1.1 简单替换法	82
5.1.2 双线性变换法	83
5.2 根匹配法	87
5.2.1 根匹配法的步骤	87
5.2.2 根匹配法的稳定性和精度	90
5.3 离散相似法	93
5.3.1 离散相似法的含义和特点	93
5.3.2 离散相似法的精度和稳定性	95
5.4 状态方程的离散化	101
5.4.1 离散化模型的推导	102
5.4.2 状态转移矩阵的近似计算	103
5.5 增广矩阵法	107
5.5.1 增广矩阵法的基本思想	107
5.5.2 不同输入信号下的增广状态方程	107
5.6 面向结构图数字仿真	112
5.6.1 连接矩阵法	113
5.6.2 例 题	115



习 题	118
参考文献	119
第 6 章 随机控制系统仿真	
6.1 随机控制系统概述	120
6.1.1 随机控制系统模型	120
6.1.2 随机控制系统仿真的专门问题	121
6.1.3 随机控制系统仿真方法	130
6.1.4 仿真结果统计特性计算	132
6.2 蒙特卡罗仿真法	133
6.2.1 仿真原理及仿真算法	133
6.2.2 仿真结果分析	136
6.3 伴随系统仿真法	136
6.3.1 仿真原理	137
6.3.2 伴随系统在确定性控制系统仿真中的应用	142
6.3.3 伴随系统在随机控制系统仿真中的应用	146
习 题	149
参考文献	149
第 7 章 实时仿真系统	
7.1 实时仿真系统概述	150
7.1.1 实时仿真系统分类	150
7.1.2 实时仿真系统基本组成及特点	151
7.2 硬件在回路仿真——半实物仿真系统	153
7.2.1 半实物仿真概述	153
7.2.2 半实物仿真主要物理效应设备	154
7.2.3 飞行器半实物仿真系统	157
7.2.4 制导武器半实物仿真系统	158
7.3 人在回路仿真	160
7.3.1 人在回路仿真概述	160
7.3.2 人在回路仿真系统——飞行模拟器	160
7.3.3 飞行模拟器结构、原理和仿真模型	161
7.3.4 飞行模拟器环境仿真关键设备	165
7.4 平台级分布交互仿真系统	169
7.4.1 分布交互仿真标准、协议和通信机制	170
7.4.2 应用实例——航空兵攻防对抗仿真系统和基于网络的飞行仿真器	181
习 题	186
参考文献	186



第 8 章 虚拟现实技术及其在系统仿真中的应用

8.1 概 述	188
8.1.1 虚拟现实(VR)技术的产生、定义、特点及系统组成	188
8.1.2 人-机多维信息交互原理及显示方式	193
8.1.3 VR 系统人机接口	198
8.2 视觉反馈原理及三维图像生成	206
8.2.1 计算机实时三维图像生成基本过程	206
8.2.2 三维图像数字化建模	206
8.2.3 坐标变换	207
8.2.4 剪裁与消隐	209
8.2.5 纹理与光照效果	209
8.2.6 立体成像	210
8.2.7 视觉环境的构造方式	214
8.3 三维虚拟声的生成原理与显示方法	214
8.3.1 三维虚拟声的生成与显示	214
8.3.2 声音的距离仿真	216
8.3.3 声音的运动仿真	216
8.3.4 三维虚拟声音的合成与定位	217
8.3.5 三维音响的显示	219
8.4 触觉/力感反馈系统	220
8.4.1 触觉/力感反馈原理	220
8.4.2 触觉/力反馈仿真设备	221
8.4.3 虚拟操作及力反馈系统举例	222
8.5 虚拟现实(VR)技术及在仿真系统中的应用	224
8.5.1 VR 技术在训练仿真器中的应用	224
8.5.2 VR 技术在虚拟样机及虚拟制造中的应用	225
8.5.3 VR 技术在虚拟战场中的应用	227
8.5.4 VR 技术在科普及娱乐中的应用	229
8.5.5 虚拟人	230
习 题	230
参考文献	231

第 9 章 建模与仿真的 VV&A 技术

9.1 引 言	232
9.2 建模与仿真的 VV&A	232
9.2.1 VV&A 概念	232
9.2.2 VV&A 的基本原则	234
9.2.3 VV&A 的工作过程	236



9.2.4 V&V 的主要技术方法	238
9.3 M&S、VV&A 与 T&E 的关系	242
9.3.1 M&S 与 T&E 的关系	242
9.3.2 VV&A 与 T&E 的关系	243
9.4 飞行模拟器的 VV&A 与 T&E 过程	244
习 题	246
参考文献	246

第 10 章 系统建模/仿真工具——MATLAB

10.1 MATLAB 功能简介	247
10.1.1 MATLAB 的基本计算功能	247
10.1.2 图形与可视化	248
10.1.3 控制系统模型与分析	251
10.2 图形建模/仿真环境——SIMULINK 主要功能及应用实例	257
10.2.1 SIMULINK 模型库	258
10.2.2 SIMULINK 模型的建立及模型特点	258
10.2.3 SIMULINK 仿真运行	259
10.2.4 SIMULINK 应用实例	261
10.3 SIMULINK 实时代码生成方法及应用实例	262
10.3.1 RTW 代码自动生成和实时系统开发环境	262
10.3.2 应用实例	266
习 题	268
参考文献	268

第 1 章 绪 论

1.1 系统仿真技术及应用

1.1.1 系统仿真技术定义

系统仿真技术是以相似原理、控制理论、计算技术、信息技术及其应用领域的专业技术为基础,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动态试验研究的一门综合性技术。系统是研究的对象;模型是系统的抽象;仿真对模型进行实验,以达到研究系统的目的。系统仿真包含三个基本的活动,即建立系统模型、构造仿真模型和进行仿真实验。联系这三个活动的是系统仿真的三要素,即系统、模型(或含系统中的某些实物)、计算机(或含某些物理效应设备)。它们的关系如图 1-1 所示。在整个建模/仿真过程中贯穿了对模型及仿真结果的校核(verification)、验证(validation)与确认(creditation)。

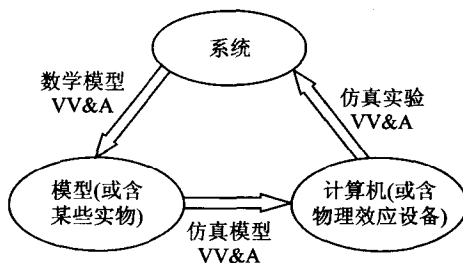


图 1-1 系统仿真三要素及相互关系

通常,在有关仿真的学术讨论、工程应用中,常采用术语“仿真”,其实,所提及的仿真也是针对一个系统,而不是单个元件或部件的仿真。因此,采用术语“系统仿真”,就是为了强调所提及的仿真是针对一个系统,以区分只是涉及单个元部件的仿真。

1. 系 统

系统(system)是客观世界中有着相互联系、相互作用,具有独立行为规律的实体的有机组合。G. 戈登在总结前人思想的基础上,将系统定义为“按照某些规律结合起来,互相作用、互相依存的所有实体的集合或总和”。

系统可以是自然的或人工的、现已存在的或未来计划构建的。尽管世界上的系统千差万



别,但都可以总结出描述系统的“三要素”,即实体、属性、活动。实体确定了系统的构成,也就确定了系统的边界;属性也称为描述变量,描述每一个实体的特征;活动定义了系统内部实体的行为和相互之间的作用,从而确定了系统内部发生变化的过程。

例如人类赖以生存的地球就是一个自然界的复杂巨系统。它包括由地心至地球外层空间十分广阔的范围,由固体地圈、大气圈、水圈和生物圈组成,称为地球系统。每一种圈(子系统)可以由许多实体组成,并都具有描述其特征的属性。不同圈层(子系统)之间具有物理、化学和生物三大相互作用的基本过程,以及人与地球系统之间的相互作用。

又如一台飞行模拟器是一个人工制造的复杂系统。它包括各种操纵机构和显示设备的飞行座舱,含描述飞行动力学、发动机及各机载系统特性仿真模型的计算机系统,提供动感的运动系统;提供力反馈感觉的操纵负荷系统以及视景、音响系统。可以将每个分系统看成一个实体(或由多个实体组成),操作人员也是一个实体。它们都有描述自身特性的属性以及相互作用的规律、互相交互的信息。例如描述飞行器动力学特性的属性有:三个姿态角、角速度、角加速度、线加速度、位置(可以是地面坐标系中的位置; X 、 Y 、 Z 或者经度、纬度、高度)等。通过操作人员输入各种信息,如操纵机构的位移、发动机油门的位移等,启动各个分系统运行后,按照事先编制的程序(系统软件及应用软件)实现各实体之间交互、运行,并且为操作人员提供各种反馈信息,成为下一步输入的依据。

2. 模 型

在仿真系统中,对模型(model)的分类有多种提法,在此,提出一种模型分类方法供参考。将模型分为物理模型、概念模型、数学模型和仿真模型。

物理模型(physical model):是一类具有某种实物物理特征的模型,如用于水洞、风洞试验的各种缩比实物模型以及各种物理效应设备,如各种转台、负载模拟器、各种人感系统等。前者采用几何外观相似的原理,通过缩小的物理模型在流场中进行实验,获得物理模型各种性能参数,它不能作为仿真实体接入仿真系统。而各种物理效应设备可以反映某种物理模型的特性,可以接入仿真系统,参加动态运行。

概念模型(conceptual model):针对一种已有的或设想的系统,对其组成、原理、要求、实现目标等,用文字、图表、技术规范、工作流程等文档来描述,反映系统中各种事物、实体、过程的相互关系,运行过程和最终结果,以此对这种系统进行非形式化的概念描述,这种描述称为概念模型。它可以作为进行相应仿真系统总体设计的概念描述,反映其系统功能是否具有完整性、相容性、连贯性和正确性;可以作为仿真系统建模开发的向导和开发人员与用户沟通理解的工具。

数学模型(mathematic model):采用数学符号与数学关系式对系统或实体内在的运动规律及与外部的作用关系进行抽象和对某些本质特征进行描述。

仿真模型(simulation model):是将数学模型通过某种数字仿真算法将其转换成能在计算机上运行的数字模型,是一类面向仿真应用的专用软件。因此仿真模型与计算机操作系统、采



用的编程语言和算法(与计算精度、稳定性、实时性要求有关)有密切关系。

3. 仿真计算机

用于仿真模型解算的计算机称为仿真计算机(simulation computer)。它是仿真系统的核心部分,是仿真活动的载体。随着计算机技术的发展,仿真计算机不断更新换代并推动仿真技术的发展。仿真计算机经历了模拟计算机(analog computer)、混合计算机(hybrid computer)、数字计算机(digital computer)的发展历程。相应的,仿真的发展也经历了模拟仿真(analog simulation)、混合仿真(hybrid simulation)、数字仿真(digital simulation)三个阶段。

(1) 模拟计算机

模拟计算机是利用具有各种数学模型特征的典型电路,组成各种典型的基本运算部件(如加法器、乘法器、积分器、函数器等),这些基本部件的输入和输出是电压,它们之间连接起来可以进行复杂的数学运算。将一个系统的数学方程按相应的运算部件连接起来,按照一定的解题方法与步骤编制模拟计算机的解题程序并启动运行,就可进行模拟计算机仿真。模拟计算机是一种并行运算的机器,计算速度很快,输入、输出均为连续的模拟信号。20世纪50年代是模拟计算机的黄金时期,同期数字计算技术开始发展。在数字计算机运算速度还较慢时只能采用模拟计算机仿真。模拟计算机仿真存在复杂函数生成困难,答题、解题不方便和模拟信号受环境影响,运算精度很难提高等缺点。

(2) 混合计算机

为了解决模拟计算机存在的问题,20世纪50年代末至70年代混合计算机从诞生发展到鼎盛时期。混合计算机是将模拟计算技术和数字计算技术灵活结合的一种计算机。它可以分为混合模拟计算机和混合计算机系统两种。前者在模拟计算机中加入大量数字逻辑部件、数控式模拟开关、模拟/数字混合部件;后者是由模拟机、混合模拟计算机、数字机及其接口设备组成的计算机系统。其目的均为了充分利用模拟计算机的并行运算和连续信号处理功能以及数字部件的迭代运算、逻辑运算和复杂函数生成功能。随着数字计算机的发展和性能/价格比的提高,逐渐取代混合计算机,成为仿真计算机的主流机型。

(3) 数字计算机

数字计算机与模拟计算机不同,它是用0和1断续变化的电脉冲数码串表示系统状态及数值并进行运算的数字式运算装置,主要由运算器、控制器、存储器、输入设备、输出设备五大部分组成。美国1978年研制出全数字仿真机AD10,1986年又开发出SYSTEM100专用全数字仿真机。中国自行研制的银河系列YH-F1及YH-F2全数字仿真计算机系统分别在1985年和1993年通过国家鉴定并在国内航空、航天等部门得到广泛应用。20世纪90年代通用数字计算机和个人计算机及网络技术迅速发展,采用通用数字计算机和微机联网系统在各个仿真领域得到广泛应用。近十年来,基于RISC技术及并行计算机技术的发展,配有面向问题仿真软件的通用高性能微机、工作站及并行机已成为仿真机的主流。目前,随着高性能计算与网络HPCN(high performance computing and networking)技术的发展与应用,支持分布建