



智能科学技术著作丛书

复杂系统建模理论、方法与技术

The Theory, Method & Technique
For Complex System Modeling

刘兴堂 梁炳成 刘力 何广军 等著



科学出版社

www.sciencep.com

复杂系统建模理论、 方法与技术

The Theory, Method & Technique
For Complex System Modeling

刘兴堂 梁炳成 刘 力 何广军等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

复杂系统建模是越来越多的复杂工程系统、社会经济系统、军事作战系统、人工生命系统等研究的基础,有着极其广泛而旺盛的社会、经济、国防和科技需求,堪称仿真科学与技术的前沿新领域。

本书是一部专门研究复杂系统建模理论、方法与技术的著作。作者在全面论述系统建模基本理论和常用建模方法的基础上,重点研究面向复杂系统数学建模的新方法与技术,以及仿真建模环境和工具,并深入讨论人们十分关心的大型复杂仿真系统建模的 VV&A 与可信度评估技术及其应用。

本书普遍适用于从事航空、航天、航海、能源、环保、工业、农业、医学、交通、生物学、经济学、人文科学等方面研究和仿真的科学工作者、工程技术人员和高校教师参考,亦可作为高校高年级学生和研究生的教科书。

图书在版编目(CIP)数据

复杂系统建模理论、方法与技术=The Theory, Method & Technique For Complex System Modeling/刘兴堂等著. —北京:科学出版社,2008

ISBN 978-7-03-021563-5

I. 复… II. 刘… III. 系统建模 IV. N945.12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 045850 号

责任编辑:刘宝莉 / 责任校对:钟 洋
责任印制:刘士平 / 封面设计:陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008年6月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2008年6月第一次印刷 印张:26 1/4

印数:1—3 000 字数:504 000

定价:68.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈科印〉)

第一作者简介

刘兴堂 1942年2月生于陕西省三原县,文职将军、空军级专家。现任空军防空导弹精确制导与控制技术研究中心主任,空军工程大学教授、“控制科学与工程”学科博士生导师。兼任中国系统仿真学会常务理事、中国航空学会飞行力学及飞行试验分会委员、中国自动化学会仿真专业委员会副主任、中国计算机用户协会仿真应用分会理事、陕西省系统仿真学会副理事长。



1965年8月西北工业大学飞机设计与制造专业本科毕业。

1968年3月西北工业大学非线性振动理论硕士研究生毕业。

1968~1982年在中国飞行试验研究院从事飞机控制系统试飞和模拟研究。曾任专业组长、大型飞行模拟器工程和航空重点仿真实验室建设主管工程师。

1982年特招入伍,在空军工程大学导弹学院从教至今。长期从事飞行器导航、制导与控制及复杂系统建模与仿真的教学和研究工作。

曾获国家科技进步奖2项、省部级科技成果奖2项、军队科技进步奖7项;出版专著、译著和大型工具书13部:《机动飞机实用空气动力学》、《飞机舵面的传动装置》、《物理量传感器》、《现代系统建模与仿真技术》、《现代飞行模拟技术》、《空中飞行模拟器》、《精确制导、控制与仿真技术》、《导弹制导控制系统分析、设计与仿真》、《现代辨识工程》、《应用自适应控制》、《新俄汉科技综合词典》、《俄汉航空航天航海科技大词典》、《复杂系统建模理论、方法与技术》;发表学术论文百余篇。

序

仿真科学与技术国民经济、国防建设和科学研究中发挥着越来越重要的作用,已成为共用的、战略性科学技术,被认为是继理论研究和实验研究之后,信息时代认识与改造世界的又一重要方法。在众多领域需求牵引下,正朝着现代化、科学化的方向迅猛发展。

系统建模是仿真科学与技术的基础和核心内容,目前已形成较为完整的理论、方法与技术体系,并向网络化、智能化和自动化的方向发展,复杂系统建模是它的前沿新领域。

为了进一步推动仿真科学与技术的发展,无论是一般系统建模或是复杂系统建模都存在着亟待普及和提高的问题。特别是随着信息化时代的到来,摆在人们面前的复杂系统问题甚至开放的复杂巨系统(如复杂工程系统、国民经济系统、社会自组织系统、生物和生态系统、人工生命系统等)问题建模任务越来越多,需要深入探讨和研究。《复杂系统建模理论、方法与技术》一书的出版正好顺应了这种潮流和社会需求。

这本书是作者长期从事系统建模与仿真研究工作的高度概括,同时反映了近年来国内外在该领域的新学术思想和成果。

我相信,该著作的出版定会受到广大读者的欢迎,为促进仿真科学与技术的不断发展和提高系统建模与仿真水平发挥重要作用。

李由虎

2007. 6. 16

中国系统仿真学会理事长、中国工程院院士

前 言

仿真科学与技术是一门研究系统建模与仿真实论、方法、技术及其应用的综合性边缘科学技术。复杂系统建模(包括数学建模与仿真建模)是它的重要组成部分和前沿新领域。

仿真科学与技术走过了 60 多年光辉历程,在工农业生产、国民经济和国防建设各个领域产生了举世瞩目的影响和效益。事实证明,凡是有科学研究、工程设计和人-机训练的地方都离不开它的支持,特别是面对一些重大的、复杂的棘手问题(如社会经济、生态环境、载人航天、军事作战、能源利用等)的研究,采用传统的理论研究和实验研究方法往往不能奏效,势必转而应用模型研究手段(即建模与仿真方法),从而为决策者、设计师和工程技术人员提供灵活、适用、有效的技术平台和研究环境,以检验他们的关键性见解、创新性观点和所作决策或方案的合理性、正确性与可行性,高效地帮助人们推动科学技术进步,促进社会发展。因此,仿真科学与技术被认为是继理论研究和实验研究之后,第三种认识与改造世界的方法,以及各门学科在当今研究手段上的“交汇点”。

目前,仿真科学与技术已发展成为集计算机科学、计算技术、图形/图像技术、网络技术、控制技术、人工智能、信息技术、系统工程、软件工程等多学科为一体的综合性高新科学技术。先进建模工具与环境、仿真高层体系结构、组件/网络/网格化、虚拟制造、虚拟环境、虚拟样机、虚拟采办等技术的迅猛发展,进一步显示出仿真科学与技术的巨大生命力和广阔前景。

随着科学技术的进步和人类社会的发展,各类系统规模越来越大,结构越来越复杂,与日俱增的复杂系统研究、复杂工程设计及高级人-机训练任务摆在我们面前,给复杂系统建模与仿真提出了严峻挑战,复杂系统建模理论、方法与技术的研究是其重要方面。为了迎接这种新的挑战,满足国民经济、国防建设和科学研究对复杂系统建模的旺盛需求,深入研究复杂系统建模科学技术,帮助广大读者学习和掌握复杂系统建模知识,我们撰写了《复杂系统建模理论、方法与技术》这本书。深信它必将成为大家的良师益友,并为进一步促进仿真科技教育的普及和提高,推动仿真科技事业快速发展作出贡献。

全书共 6 章。第 1 章是绪论:阐明复杂性概念、复杂系统提法及特点;概述复杂系统研究对象与方法,并提出复杂系统建模问题及系统建模体系结构。第 2 章是系统建模的基本理论:论述系统数学建模和仿真建模的主要理论基础,特别是用于复杂系统建模的新理论,如复杂适应系统(CAS)理论、系统辨识理论、系统分形

理论、定性理论、模糊理论、云理论、灰色系统理论、自组织理论、元模型理论和元胞自动机与支持向量机理念等。第3章是常用数学建模方法、原理及案例:概述数学建模方法体系;提出数学建模方法选取原则;系统讨论常用的17种数学建模方法的原理、过程及案例。第4章是面向复杂系统建模的新方法与技术:论述复杂系统建模的特殊性和重要思考;重点研究适于复杂系统的建模方法、原理、技术及其典型应用。第5章是复杂系统M&S支撑环境及工具:介绍并推荐复杂系统建模与仿真的先进环境及工具;指出主要M&S软件和语言的工程应用。第6章是大型复杂仿真系统的VV&A及可信度评估:阐述VV&A概念及有关概念;深入讨论大型复杂仿真系统的VV&A技术及应用,以及系统M&S的可信度评估方法。

本书是作者多年的教学和科研总结,同时反映了近年来该领域的新思想、新观点和新研究成果。

参与本书撰写的作者除刘兴堂、梁炳成、刘力、何广军外,还有赵玉芹、吴晓燕、白云、李小兵、刘宏、柳世考、赵敏荣、牛中兴、张双选、张刚、宋坤、王超、许杰等同志。

本书出版得到了军队“2110工程”的资助和空军工程大学导弹学院领导、机关和同仁们的大力支持,尤其受到了仿真界著名专家李伯虎、王子才、黄先祥、王正中、王行仁、肖田元、黄柯棣、王精业等同志的热情鼓励和帮助。中国系统仿真学会理事长李伯虎院士专门为此书作序。此外,本书内容不少汲取了参考文献的丰富营养。这里,一并衷心感谢各位领导、专家、文献作者、同仁及出版社的同志们。

由于复杂系统建模是仿真科学与技术的前沿新领域,涉及知识面既广又深,而作者水平有限,书中难免存在不妥之处,敬请广大读者批评指正。

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 系统概念与分类	1
1.1.1 系统概念	1
1.1.2 系统分类	1
1.2 复杂性概念与复杂系统提法	3
1.2.1 复杂性概念	3
1.2.2 复杂系统提法	3
1.3 复杂系统的特点、研究对象及方法	4
1.3.1 复杂系统的特点	4
1.3.2 复杂系统的研究对象	5
1.3.3 复杂系统的研究方法	5
1.4 系统研究现状和趋势	6
1.4.1 研究现状	6
1.4.2 发展趋势	7
1.5 系统建模与仿真	7
1.5.1 模型概念、性质及分类	7
1.5.2 数学建模及其过程	9
1.5.3 仿真建模与系统仿真	10
1.5.4 系统建模与仿真体系结构	11
1.6 对复杂问题建模与仿真的重要思考	12
1.6.1 复杂系统研究是建模与仿真发展的动力源	12
1.6.2 支撑复杂系统建模与仿真的新理论	13
1.6.3 复杂系统建模方法学进展	14
1.6.4 适应于复杂仿真系统的体系结构	14
1.6.5 复杂系统建模环境及工具	14
1.6.6 复杂仿真系统与 VV&A 技术	15
思考题	15

第 2 章 系统建模的基本理论	16
2.1 引言	16
2.2 模型论及其相关理论	16
2.2.1 引言	16
2.2.2 实际系统的抽象	16
2.2.3 系统描述及其保存关系	17
2.2.4 模型的非形式化与形式化描述	20
2.2.5 模型集总	22
2.2.6 模型简化	23
2.2.7 模型修改	28
2.2.8 模型灵敏度分析	29
2.2.9 模型的有效性及其可信性	31
2.3 相似理论及演绎推理	34
2.3.1 引言	34
2.3.2 相似概念及分类	35
2.3.3 相似关系	36
2.3.4 相似定理	36
2.3.5 演绎推理	38
2.3.6 连续物理系统的相似性及其模型通式	39
2.4 系统辨识理论	40
2.4.1 系统辨识概念、定义及要素	40
2.4.2 系统辨识框架和内容	41
2.4.3 系统辨识方法与算法	43
2.5 系统层次性与分形理论	46
2.5.1 系统的层次性概念	46
2.5.2 系统分析与层次分析	46
2.5.3 系统层次分析方法概述	47
2.5.4 系统分形概念	51
2.5.5 分形理论的要点	51
2.6 复杂适应系统理论	53
2.6.1 基本概念	54
2.6.2 CAS 树	55
2.6.3 主体的适应和学习	55
2.6.4 CAS 宏观模型	57

2.7 定性理论、模糊理论及云理论	59
2.7.1 定性理论的产生及其范畴	59
2.7.2 定性推理	60
2.7.3 定性建模	62
2.7.4 模糊理论的产生	64
2.7.5 模糊集合(论)	64
2.7.6 模糊集合运算和基本定理	65
2.7.7 模糊数和模糊集合特征描述	67
2.7.8 模糊关系	67
2.7.9 云理论	68
2.8 自组织理论	71
2.8.1 引言	71
2.8.2 理论基础及研究范畴	71
2.8.3 系统自组织概念	71
2.8.4 耗散结构论	72
2.8.5 协同学	72
2.8.6 日趋完善的自组织理论	73
2.9 元胞自动机与支持向量机理念	74
2.9.1 引言	74
2.9.2 元胞自动机理念	74
2.9.3 元胞自动机的功能特点	75
2.9.4 支持向量机理念和内涵	76
2.9.5 支持向量分类机	76
2.9.6 支持向量回归机	77
2.10 灰色系统理论和马尔可夫理论	78
2.10.1 引言	78
2.10.2 灰色系统基本原理	78
2.10.3 灰色系统理论体系结构	79
2.10.4 灰色概念、运算及灰色联度分析	79
2.10.5 灰色系统建模	81
2.10.6 马尔可夫过程	81
2.10.7 马尔可夫链及其相关定义和定理	82
2.11 图论	86
2.11.1 引言	86

2.11.2	图概念及重要术语	87
2.11.3	树及其生成树	88
2.11.4	遍历、欧拉图及哈密顿图	88
2.11.5	图矩阵	88
2.12	网络理论	89
2.12.1	引言	89
2.12.2	基本概念及其物理意义	89
2.12.3	网络最大流及最小流	90
2.12.4	最短路和最小代价流	91
2.12.5	工程网络图	92
2.12.6	计算机网络	93
2.12.7	Petri 网	95
2.12.8	人工神经网络	96
2.12.9	贝叶斯网	98
2.13	元模型及综合集成研讨厅理念	100
2.13.1	引言	100
2.13.2	元模型理念及其相关概念	100
2.13.3	综合集成研讨厅理念	102
2.14	虚拟现实及其相关理论	103
2.14.1	引言	103
2.14.2	基本概念及定义	103
2.14.3	VR 系统及分类	104
2.14.4	VR 硬、软件工具	104
2.14.5	VR 技术及其应用	105
	思考题	108
第 3 章	常用数学建模方法、原理及案例	110
3.1	概述	110
3.1.1	引言	110
3.1.2	数学建模方法的选取	110
3.2	机理分析法	111
3.2.1	方法原理	111
3.2.2	建模过程	111
3.2.3	应用案例	112
3.3	直接相似法	114

3.3.1	方法原理	114
3.3.2	建模过程	114
3.3.3	应用案例	115
3.4	量纲分析法	116
3.4.1	方法原理	116
3.4.2	建模过程	116
3.4.3	应用案例	117
3.5	比例法	118
3.5.1	方法原理	118
3.5.2	建模过程	118
3.5.3	应用案例	118
3.6	概率统计法	119
3.6.1	方法原理	119
3.6.2	建模过程	119
3.6.3	应用案例	120
3.7	回归分析法	122
3.7.1	方法原理	122
3.7.2	建模过程	122
3.7.3	应用案例	122
3.8	集合分析法	125
3.8.1	方法原理	125
3.8.2	建模过程	125
3.8.3	应用案例	125
3.9	层次分析法	129
3.9.1	方法原理	129
3.9.2	建模过程	129
3.9.3	应用案例	132
3.10	图解法	134
3.10.1	方法原理	134
3.10.2	建模过程	134
3.10.3	应用案例	136
3.11	蒙特卡罗法	137
3.11.1	方法原理	137
3.11.2	建模过程	137

3.11.3 应用案例	137
3.12 模糊集论法	138
3.12.1 引言	138
3.12.2 隶属函数确定法	139
3.12.3 模糊聚类分析法	140
3.12.4 模糊模式识别法	142
3.12.5 模糊综合评判法	143
3.13 “隔舱”系统法	144
3.13.1 方法原理	144
3.13.2 建模过程	144
3.13.3 应用案例	144
3.14 灰色系统法	146
3.14.1 方法原理	146
3.14.2 建模过程	146
3.14.3 应用案例	146
3.15 想定法	149
3.15.1 方法原理	149
3.15.2 建模过程	149
3.15.3 应用案例	149
3.16 计算机辅助法	150
3.16.1 方法原理	150
3.16.2 建模过程	151
3.16.3 应用案例	151
3.17 系统辨识法	152
3.17.1 方法原理	152
3.17.2 建模过程	153
3.17.3 应用案例	153
3.18 神经网络法	155
3.18.1 方法原理	155
3.18.2 建模过程	156
3.18.3 应用案例	156
思考题	158
第4章 面向复杂系统建模的新方法与技术	161
4.1 概述	161

4.2 混合建模方法与技术	161
4.2.1 引言	161
4.2.2 分析-统计法	161
4.2.3 模糊辨识法	164
4.2.4 基于模糊神经网络的模型辨识	167
4.3 组合建模方法与技术	171
4.3.1 方法原理	171
4.3.2 技术特点	172
4.3.3 典型应用	172
4.4 基于智能技术的 Agent/MAS 建模方法与技术	175
4.4.1 引言	175
4.4.2 方法原理	175
4.4.3 技术特点	176
4.4.4 典型应用	177
4.5 基于 Petri 网建模方法与技术	179
4.5.1 引言	179
4.5.2 方法原理	180
4.5.3 技术特点	181
4.5.4 典型应用	181
4.6 马尔可夫建模方法与技术	184
4.6.1 引言	184
4.6.2 动态系统传统马尔可夫建模方法与技术	185
4.6.3 动态系统模糊马尔可夫建模方法与技术	188
4.7 Bootstrap、Bayes 及 Bayes Bootstrap 建模方法与技术	191
4.7.1 引言	191
4.7.2 Bootstrap 建模方法与技术	191
4.7.3 Bayes Bootstrap 建模方法与技术	192
4.7.4 Bayes 建模方法与技术	194
4.8 基于贝叶斯网的建模方法与技术	197
4.8.1 引言	197
4.8.2 基于专家主导的贝叶斯网建模方法与技术	197
4.8.3 基于联结树的贝叶斯网建模方法与技术	201
4.9 定性建模方法与技术	203
4.9.1 引言	203

4.9.2	基于 p -范数的近似推理定性建模方法与技术	203
4.9.3	基于通用系统问题求解系统理论的归纳推理定性建模方法与技术	206
4.9.4	基于 QSIM 算法的定性建模方法与技术	210
4.9.5	基于微分方程定性理论的建模方法与技术	213
4.9.6	基于范例推理建模方法与技术	217
4.10	基于因果关系的建模方法与技术	219
4.10.1	引言	219
4.10.2	方法原理	219
4.10.3	技术特点	220
4.10.4	典型应用	220
4.11	基于云理论的建模方法与技术	223
4.11.1	引言	223
4.11.2	方法原理	223
4.11.3	技术特点	224
4.11.4	典型应用	224
4.12	基于元模型的建模方法与技术	228
4.12.1	引言	228
4.12.2	方法原理	228
4.12.3	技术特点	229
4.12.4	典型应用	229
4.12.5	基于元模型的仿真模型表示及建模方法	231
4.13	基于元胞自动机的建模方法与技术	232
4.13.1	引言	232
4.13.2	方法原理	233
4.13.3	技术特点	234
4.13.4	典型应用	234
4.14	基于支持向量机的建模方法与技术	236
4.14.1	引言	236
4.14.2	方法原理	236
4.14.3	技术特点	236
4.14.4	典型应用	237
4.15	基于超高计算智能逼近的建模方法与技术	242
4.15.1	引言	242
4.15.2	基于量子神经网络的建模方法与技术	242

4.15.3	基于协同进化计算的建模方法与技术	244
4.15.4	基于多智能体遗传算法的建模方法与技术	247
4.16	基于混合专家系统的建模方法与技术	250
4.16.1	引言	250
4.16.2	方法原理	251
4.16.3	技术特点	251
4.16.4	典型应用	252
4.17	综合集成建模方法与技术	253
4.17.1	引言	253
4.17.2	方法原理	254
4.17.3	技术特点	255
4.17.4	典型应用	255
4.18	基于CAS理论的建模方法与技术	257
4.18.1	引言	257
4.18.2	方法原理	258
4.18.3	技术特点	259
4.18.4	典型应用	259
4.19	基于自组织理论的建模方法与技术	261
4.19.1	引言	261
4.19.2	基于GMDH建模的方法原理	261
4.19.3	基于GMDH建模的技术特点	263
4.19.4	基于GMDH建模的典型应用	263
4.20	基于分形理论的建模方法与技术	266
4.20.1	引言	266
4.20.2	方法原理	266
4.20.3	技术特点	267
4.20.4	典型应用	267
4.21	多分辨率建模方法与技术	269
4.21.1	引言	269
4.21.2	方法原理	270
4.21.3	技术特点	270
4.21.4	典型应用	271
4.22	面向对象建模方法与技术	276
4.22.1	引言	276

4.22.2	方法原理	277
4.22.3	技术特点	277
4.22.4	典型应用	278
	思考题	281
第5章	复杂系统 M&S 支撑环境及工具	283
5.1	概述	283
5.2	UML/Rational Rose	283
5.2.1	引言	283
5.2.2	UML/Rational Rose 简介	284
5.2.3	应用实例	284
5.3	ABM/Swarm	288
5.3.1	引言	288
5.3.2	Swarm 平台简介	288
5.3.3	应用实例	289
5.4	HLA/RTI	292
5.4.1	引言	292
5.4.2	基本思想及开发过程	292
5.4.3	应用实例	294
5.5	OpenGL/Vega 和 MultiGen/Creator	297
5.5.1	引言	297
5.5.2	OpenGL/Vega 简介	298
5.5.3	MultiGen/Creator 简介	301
5.5.4	应用实例	303
5.6	MATLAB/Simulink	305
5.6.1	引言	305
5.6.2	MATLAB/Simulink 简介	305
5.6.3	应用实例	307
5.7	ADAMS/View	311
5.7.1	引言	311
5.7.2	ADAMS 简介	311
5.7.3	应用实例	314
5.8	STAGE/STRIVE	316
5.8.1	引言	316
5.8.2	STAGE 简介	316