



Complex Engineered Systems
Modeling and Simulation

杂工程系统 建模与仿真

邓方林 等著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

复杂工程系统 建模与仿真

**Complex Engineered Systems
Modeling and Simulation**

邓方林 廖守亿 孙新利 著
王宏力 鲜勇 刘志国

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

复杂工程系统建模与仿真/邓方林等著. —北京:国防
工业出版社, 2009. 8

ISBN 978-7-118-06248-9

I. 复... II. 邓... III. ①导弹—系统建模—研究②导弹—
系统仿真—研究 IV. TJ76

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 034031 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 850 × 1168 1/32 印张 11 1/4 字数 296 千字

2009 年 8 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 42.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 68428422

发行邮购: (010) 68414474

发行传真: (010) 68411535

发行业务: (010) 68472764

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革

开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金

评审委员会

国防科技图书出版基金

第六届评审委员会组成人员

主任委员 刘成海

副主任委员 宋家树 蔡 镭 程洪彬

秘书长 程洪彬

副秘书长 彭华良 贺 明

委员 于景元 才鸿年 马伟明 王小谟
(按姓氏笔画排序)

甘茂治 甘晓华 卢秉恒 邬江兴

刘世参 芮筱亭 李言荣 李德仁

李德毅 杨 伟 吴有生 吴宏鑫

何新贵 张信威 陈良惠 陈冀胜

周一宇 赵万生 赵凤起 崔尔杰

韩祖南 傅惠民 魏炳波

本书主审委员 于景元

前 言

人类从“必然王国”走向“自由王国”的历史长河中,人和自然的交互与斗争、人类的实践与认识及创新与发展等,书写了许多不朽的篇章,创造了人类历史的文明。系统科学的发展也是一个由简单到复杂、由易到难、由浅入深的漫长发展过程。其中,“复杂系统理论”是人类文明史中新的篇章,复杂性科学更被誉为“21 世纪的科学”。

然而,如何认识“复杂系统”与“简单系统”、“整体论”与“还原论”的关系,是一个正被热议和值得深入研究的问题,能否在“复杂系统”与“复杂工程系统”之间建立起某种内在的联系?企盼“整体论”与“还原论”能在理论上互相渗透、方法上相互借鉴,以使复杂系统理论与方法能在复杂工程系统中得到应用,我们才萌生了把自己的科研实践和初步认识整理成这本书,供同行们参考,也为我们自己的研究“投石问路”的想法。若能为此领域的研究“抛砖引玉”,我们将感到十分欣慰。

人类为改造自然,构建了许多人工系统,如导弹/航天工程系统、生物工程系统、互联网等网络工程系统、智能机器人系统、军事指挥与控制系统(如 C⁴ISR 系统)等,都具有不同程度的复杂性,本书把它们称为复杂工程系统。有些工程系统本身也许算不上复杂系统,但其特殊的用途和运行环境,如导弹/航天、热核反应等的高可靠、高安全性的要求,必须通过某些特殊的设计来保证其稳定性,从而使系统增加了复杂性,也变成复杂工程系统。

但是,自有人类文明以来,人类为了生存和发展,在不同的历史时期,面对各种复杂工程问题,只能假设它们满足有利于问题解

决的某些边界条件,然后再运用已经掌握的某些简化的方法来处理,也是由于技术的条件限制不得已而为之。这些成功的简化,在当时满足工程要求的条件下常常被证明是可行和有效的。由于现代科学的飞速发展,复杂性科学正在建立起它的理论体系,“复杂性科学”与“经典科学”、“复杂系统”与“简单系统”、“整体论”与“还原论”等的对立与冲突、继承与发展显现出来了,许多潜在的相关问题也相继浮现出来,需要人们用大智慧去面对和解决,既要用辩证唯物史观面对人类文明的继承,又要用科学发展观和满腔热忱去迎接新的理论与方法的诞生;既要从思想上承认发展是硬道理,推陈出新是历史的必然,又要从理论和方法上弄清它们之间的关系,真正做到“推陈出新,古为今用”,这将是一个长期的研究和验证的过程。

仿真研究以系统为对象。随着系统科学、计算机科学及信息技术、控制科学的发展,仿真科学与技术发展很快,近年来,“建模与仿真”方面的著作很多,但对复杂工程系统进行论述的著作还未曾见到。本书以导弹武器系统为背景,对复杂工程系统的建模与仿真加以讨论,目的在于探索有没有可能运用复杂系统的理论和方法来解决或指导解决工程系统中的复杂性问题。

本书提出若能把复杂系统理论、方法与基于“还原论”的传统理论方法相结合,加以必要的改进和融合,用来解决复杂工程系统的问题,不仅是对复杂系统理论与方法的充实和应用范围的扩展,也是对复杂工程系统认识 and 解决方法的重大提高,这是一项艰巨的任务,可能需要几代人的努力。

本书共分8章。

第1章为绪论。

第2章讨论了复杂系统/复杂工程系统的基本理论、方法;讨论了复杂系统的理论体系,复杂性与简单性、整体论与还原论,并从方法论的角度来认识和界定复杂系统和复杂性;还讨论了复杂系统的建模与仿真等相关问题。

第3章~第8章面对导弹武器这一复杂工程系统,特别是针

对该类系统的建模与仿真、研制与试验、管理与作战中的几个有特色的问题,集中讨论了以下4个有代表性的问题。一是基于“摄动制导理论”和“还原论”的分立式建模方法在我国第一代战略导弹中获得了成功的应用,而在第二代导弹中却受到了严峻的挑战,原因何在?如何解决?第3章~第5章介绍了作者从1987年开始提出的基于“整体论”思想的导弹六自由度一体化建模的理论和方法,并研究了它的实践和应用。二是我国参加了禁止核试验条约,不能用实物进行热核反应试验,仿真成为核武器研制和试验的重要手段,而核武器是一个复杂工程系统,它的设计、研制和仿真都具有复杂性。第6章讨论了热核爆轰的建模与仿真问题。三是精确制导问题。远程精确打击是现代高技术战争的核心问题,从表面上看精确制导是在末端实施,但从系统论的角度来看它并非只是导引头的问题,而是涉及导弹制导与控制全过程的系统工程问题,这将在本书第7章中讨论。四是美国大搞导弹防御系统,并成为实现其政治、军事目的的重要手段,我们如何应对?在导弹突防与拦截这一对矛盾中,我们也不能回避,本书第8章讨论了导弹攻防对抗的建模与仿真,这是复杂的体系对抗问题。以上4个方面的问题是战略核武器研制与作战的核心问题,本书从建模与仿真方面进行了深入的讨论。由于以上问题涉及到的部分内容和仿真结果属涉密内容,相关数据、图表和结果均进行了非密化处理,但不影响原理和方法的讨论,请读者谅解。

本书内容主要以邓方林教授领导的课题组20余年来完成的多项获奖成果(国家科技进步一等奖1项、二等奖3项和军队科技进步一等奖4项、二等奖5项)中的部分内容为基础撰写而成,源于实践且理论与工程应用相结合是本书的特点。本书在邓方林教授的统筹下,第1章、第2章由廖守亿执笔,第3章、第4章由邓方林执笔,第5章由王宏力执笔,第6章由孙新利执笔,第7章由刘志国执笔,第8章由鲜勇执笔。全书由廖守亿统稿,邓方林和廖守亿审校。

感谢没有参加本书撰写的课题组其他同志,多年来在本书涉

及的研究内容中付出的辛勤劳动和创新性贡献;也感谢为本书文字输入和图表绘制付出辛勤劳动的研究生刘兴森、杨东方等同志。同时要感谢赵人濂研究员为本书的部分内容提供的帮助。本书还引用和参考了不少参考文献,从中汲取了丰富的营养,在此对这些中外专家、学者表示感谢。

本书适合我国航天、航空和兵器等部门从事飞行器设计,导航、制导与控制,作战与兵器运用,系统工程,系统建模与仿真等相关专业的科技人员作为参考用书,也可作为高等院校相关专业研究生教材或参考书。

尽管我们做出了最大的努力,但由于该书内容涉及多个学科专业,知识面宽,有些还处于不断发展之中,本书难免存在疏漏之处,恳请同行专家和广大读者批评指正。

作 者

目 录

第1章 绪论	1
1.1 系统仿真	1
1.1.1 系统仿真的定义	1
1.1.2 系统的概念与分类	2
1.1.3 工程与复杂工程系统	6
1.2 仿真技术的发展	7
1.3 导弹、航天系统与仿真技术	11
第2章 复杂系统与复杂性	13
2.1 复杂系统与复杂性理论	14
2.1.1 现代系统科学	14
2.1.2 非线性科学	16
2.1.3 复杂系统与复杂性科学	18
2.1.4 复杂系统理论的综合分析	29
2.2 复杂系统与复杂性处理方法	33
2.2.1 还原论与整体论	34
2.2.2 复杂性科学的方法论原则	41
2.2.3 开放复杂巨系统理论与方法	43
2.2.4 复杂适应系统理论与方法	46
2.2.5 复杂工程系统理论	49
2.2.6 导弹武器系统是复杂工程系统的初步分析	52
2.2.7 复杂系统与复杂性研究思路	54
2.3 复杂系统建模与仿真	54
2.3.1 复杂系统建模与仿真特点	55

2.3.2	复杂系统建模与仿真难点	64
2.3.3	复杂系统分布仿真	66
2.4	复杂系统建模与仿真的应用领域	68
2.4.1	经济领域	68
2.4.2	社会领域	69
2.4.3	军事领域	70
2.4.4	其他领域	72
第3章	战略导弹运动复杂性及几种特殊运动建模	73
3.1	弹体横向弯曲振动方程的建立	74
3.1.1	弹体横向自由振动方程及其运动特性	74
3.1.2	弹体横向强迫振动方程及其耦合作用	80
3.2	弯曲振动条件下作用在弹体上的广义力和广义力矩	82
3.2.1	考虑弹性振动的推力	82
3.2.2	摇摆发动机产生的惯性力对应的广义力	86
3.2.3	空气动力对应的广义力	88
3.2.4	用广义质量和广义力表示的弹性弹体运动方程	93
3.3	弹性弹体结构离散化方法——传递矩阵法	96
3.3.1	弹性元件(无质量、无惯性)的传递矩阵	97
3.3.2	典型节点的传递矩阵	99
3.3.3	梁的总传递矩阵	99
3.3.4	单分枝梁的传递矩阵	100
3.3.5	多分枝结构传递矩阵	102
3.3.6	用传递矩阵计算导弹横向振动特性	105
3.4	液体推进剂晃动分析及其建模	106
3.4.1	液体自由晃动的基本方程	107
3.4.2	推进剂强迫晃动的数学建模	111
3.5	对晃动频率的控制措施及晃动质量计算	116
3.5.1	晃动频率控制	116
3.5.2	晃动质量及其位置	119

3.5.3	晃动等效力学模型——工程二次简化	122
3.5.4	弹簧质量系统的等效运动方程	125
第4章	弹道导弹六自由度一体化建模方法与理论	127
4.1	摄动制导理论的贡献及其局限性	127
4.1.1	“摄动理论”与“摄动制导”	127
4.1.2	导弹非线性系统的摄动方程	130
4.1.3	摄动制导的关机控制泛函	134
4.1.4	摄动理论对宇航事业发展的贡献及其局限性	135
4.2	基于整体论的弹道导弹一体化建模理论与方法	137
4.2.1	问题的提出	137
4.2.2	弹道导弹六自由度一体化建模的原则和特点	139
4.2.3	系统整体建模与分系统模型的关系	142
4.2.4	基于整体论的导弹一体化建模方法	143
4.3	基于牛顿力学定律的导弹六自由度一体化建模举例	145
4.3.1	六自由度建模中的坐标转换关系	145
4.3.2	导弹质心运动方程	147
4.3.3	绕质心运动方程	153
4.3.4	关机方程和导引方程	155
4.3.5	控制系统模型	155
4.3.6	导弹复合运动状态中弹体的一体化模型	158
4.4	基于能量守恒原理的弹道导弹一体化建模	163
第5章	弹道导弹六自由度仿真与应用	174
5.1	六自由度仿真模型的验证与确认	174
5.1.1	理论仿真验模	175
5.1.2	六自由度仿真模型基于半实物仿真的验模	178
5.1.3	六自由度仿真模型基于飞行试验的验模	181
5.2	六自由度仿真的实现	182
5.2.1	用 YH-F2 仿真计算机实现六自由度仿真	182

5.2.2	基于小型通用并行仿真计算机的六自由度仿真研究	184
5.3	六自由度仿真应用研究	187
5.3.1	弹道导弹全寿命六自由度仿真决策系统	188
5.3.2	在控制系统评审与定型中的应用研究	190
5.3.3	在导弹质量评估与发射决策中的应用研究	193
5.3.4	在导弹故障分析和辅助定位中的应用研究	195
5.3.5	六自由度仿真在闭环动态测试中的应用	201
第6章	核武器中聚合爆轰作用的复杂性与建模仿真	206
6.1	爆炸作用的复杂性与计算机仿真	206
6.1.1	核爆炸物理过程的复杂性	206
6.1.2	多维非线性造成的计算复杂性	208
6.1.3	仿真技术在核武器发展中的重要作用	210
6.2	高压环境下的固体物态方程	213
6.2.1	非含能固体物态方程	213
6.2.2	凝聚态炸药及其爆轰产物物态方程	225
6.2.3	仿真计算中的物态方程式	230
6.3	大变形非线性仿真数学模型	233
6.3.1	ALE 描述法	234
6.3.2	拉格朗日描述法	239
6.4	物理模型及其离散化	241
6.4.1	基本结构	241
6.4.2	算法及其选择	241
6.4.3	模型离散化	243
6.4.4	材料模型	244
6.5	数值仿真结果与分析	244
6.5.1	金属壳层单元物理参量的变化图	244
6.5.2	金属球体情况	247
6.6	球形爆轰驱动计算模型的间接考核	249
6.6.1	间接考核试验模型	249
6.6.2	间接考核试验模型试验与数值仿真结果对比	251

第7章 多传感器组合导航与精确制导复杂性分析与建模	254
7.1 多传感器组合导航复杂性分析与建模	255
7.1.1 多传感器信息融合系统分析	255
7.1.2 基于卡尔曼滤波技术的组合导航系统建模	259
7.1.3 基于智能化信息融合技术的组合导航系统建模	264
7.2 精确制导武器系统复杂性分析	272
7.2.1 制导方式的多样性	273
7.2.2 作战过程的复杂性	279
7.2.3 工作环境的复杂性	280
7.3 一类典型的精确制导武器仿真建模	285
7.3.1 激光制导炸弹仿真建模	285
7.3.2 激光制导炸弹仿真研究	302
第8章 导弹攻防对抗系统建模	308
8.1 导弹攻防对抗概述	308
8.2 导弹攻防对抗仿真的发展及应用	309
8.2.1 作战模拟的发展与应用	310
8.2.2 攻防对抗仿真的发展与应用	312
8.3 常规导弹作战对抗体系分析	314
8.3.1 常规导弹作战体系基本构成	314
8.3.2 对抗方作战体系分析	317
8.3.3 联合作战下常规导弹作战对抗体系结构分析	321
8.4 常规导弹对抗仿真模型	322
8.4.1 常规导弹对抗过程分析	322
8.4.2 仿真系统模型	323
8.4.3 作战行动模型	337
8.4.4 综合自然环境建模	338
8.4.5 作战决策模型	339
8.4.6 网络管理控制模型	341
8.4.7 综合评估模型	343
参考文献	345

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 System Simulation	1
1.1.1 The Concepts of System Simulation	1
1.1.2 Concepts and Classification of Systems	2
1.1.3 Engineering and Complex Engineered System	6
1.2 Development of System Simulation	7
1.3 Simulation Technology in Missile&Aerospace System	11
Chapter 2 Complex Systems and Complexity	13
2.1 Complex Systems and Complexity Theories	14
2.1.1 Modern System Science	14
2.1.2 Nonlinearity Science	16
2.1.3 Complex Systems and Complexity Science	18
2.1.4 Comprehensive Analysis of Complex Systems Theories	29
2.2 Methods for Complex Systems and Complexity	33
2.2.1 Reductionism and Holism	34
2.2.2 The Methodology Principle for Complexity Science	41
2.2.3 Open Complex Giant System Theory and Methodology	43
2.2.4 Complex Adaptive System Theory and Methodology	46
2.2.5 Complex Engineered System Theory	49
2.2.6 Missile Weapon System is a Complex Engineered System	52
2.2.7 Research Framework for Complex Systems and Complexity	54
2.3 Modeling and Simulation for Complex Systems	54

2.3.1	The Characteristics of M&S for Complex Systems	55
2.3.2	The Difficulty of M&S for Complex Systems	64
2.3.3	Distributed Simulation for Complex Systems	66
2.4	Application Field of M&S for Complex Systems	68
2.4.1	Economic Field	68
2.4.2	Social Field	69
2.4.3	Military Field	70
2.4.4	Other Fields	72
Chapter 3 The Complexity of Strategic Missile's Motion and Modeling of The Particular Motions		73
3.1	Build the Equation of Lateral Winding Vibration for Missile-Bodies	74
3.1.1	The Equation and Motion Features of Lateral Free Vibration for Missile-Bodies	74
3.1.2	The Equation and Coupling Affects of Lateral Enforcing Vibration for Missile-Bodies	80
3.2	The Generalized Forces and Moments Acted on Missile-Bodies under the Condition of Winding Vibration	82
3.2.1	Thrust under Elastic Vibration	82
3.2.2	The Corresponding Generalized Forces of Inertial Forces Produced by Vacillating Thrusters	86
3.2.3	The Corresponding Generalized Forces of Aerodynamic ...	88
3.2.4	The Motion Equations Represented by Generalized Mass and Forces of Elastic Missile-Bodies	93
3.3	The Discretization Methods of the Elastic Missile- Bodies Structure—Transfer-matrix Method	96
3.3.1	The Transfer-matrix of Elastic Components(No Mass, No Inertia)	97
3.3.2	The Transfer-matrix of Typical Node	99
3.3.3	The Assemble Transfer-matrix of Beam	99
3.3.4	The Transfer-matrix of Beam with a Branch	100