

# 电子信息系统 仿真可信度评估 理论方法

戚宗锋 李 林 刘文钊 符淑芹 蒙 洁 著  
王国良 主 审



國防工業出版社

National Defense Industry Press

# 电子信息系统仿真 可信度评估理论方法

戚宗锋 李林 刘文钊 符淑芹 蒙洁 著  
王国良 主审

国防工业出版社

· 北京 ·

## 内 容 简 介

本书是仿真可信度评估领域中理论和实践经验的总结,主要介绍仿真系统与模型可信度评估的相关内容,全书共6章,第1章综述了仿真可信度评估的发展历程、现状、难点以及研究意义;第2章总结整理了一些实用的仿真模型的可信度评估方法;第3章定义了仿真模型可信度评估特征的概念,并建立了基于仿真模型可信度评估特征的仿真模型可信度评估方法分类;第4章建立了一种新的基于虚拟属性集划分的仿真系统可信度评估方法;第5章总结整理了与仿真可信度评估相关的一些数据预处理方法;第6章介绍了所开发的仿真可信度评估软件系统以及一个雷达仿真系统可信度评估的实例。

本书适合仿真系统开发、仿真系统测试、VV&A 以及武器装备研发、试验等领域的人员阅读使用,也可做为电子系统仿真等相关专业的高年级本科生和研究生的教学参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

电子信息系统仿真可信度评估理论方法 / 戚宗锋等著.

—北京:国防工业出版社,2013.5

ISBN 978-7-118-08639-3

I. ①电... II. ①戚... III. ①电子系统-信息系统-系统仿真-技术评估 IV. ①TN103

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 080933 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)

北京嘉恒彩色印刷责任有限公司

新华书店经售

\*

开本 710×1000 1/16 印张 12 $\frac{3}{4}$  字数 240 千字

2013 年 5 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 58.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

# 前 言

随着计算机技术的发展,系统建模与仿真技术在社会、军事等各个领域的应用越来越广泛,计算机仿真也被列为继科学理论和科学实验之后第三种认识客观世界和改造客观世界的手段,由此仿真的可信度评估也伴随着仿真技术的发展日益成为重要的研究课题。

仿真可信度的研究始于20世纪60年代,世界各国相继开展仿真可信度的研究工作,诞生了一系列的研究成果,如界定了VV&A的定义、制定了VV&A标准和规范等宏观研究成果。在仿真模型可信度的评估方法研究上,陆续应用了数理统计方法、频谱分析法、时间序列分析方法等;在仿真系统的可信度评估方法研究上,陆续应用了相似度法、层次分析法和模糊综合评判法等。

自20世纪90年代以来,作者所在单位开展了电子信息系统仿真以及仿真的可信度评估研究工作。针对前辈们所研究提出的各种仿真可信度评估方法,结合我们的应用经验,修正、改进了原有方法中的一些问题和瑕疵;结合实践工作中的应用需求,提出了一些新的方法。在此基础上陆续整理、总结了一系列工程上实用的仿真模型可信度评估理论方法,形成了一套适用于电子信息系统仿真模型可信度评估方法的规范和流程;针对系统级仿真可信度评估,在分析总结原有方法基础上,提出一种新的基于虚拟属性划分的仿真可信度评估理论方法,并能够根据仿真可信度评估结果和工程应用需求,快速准确定位待改进模型节点。本书是在作者多年研究和广泛工程应用实践的基础上,对上述的仿真可信度评估方法(包括模型和系统两个层次)进行总结、整理而成。

本书由王国良同志主审,戚宗锋提出全书结构并负责统稿,第1章由戚宗锋撰写,第2章由蒙洁、符淑芹、刘文钊等撰写,第3章由戚宗锋撰写,第4章由李林撰写,第5章由刘文钊、符淑芹撰写,第6章由戚宗锋、李林、刘文钊等撰写。

在本书的写作过程中,曾勇虎、赵锋、刘进、李永祯、洪丽娜、赵艳丽、杜静、韩文彬、王岩、王华兵、李晓燕、祝小鹰等同志参加了部分内容的研讨,提出了许多宝贵的意见;洛阳电子装备试验中心与中心研究所的领导和机关对本书的写作给予了大力的支持;申绪润、马孝尊、孔德培、张德锋、杜震、汪亚、陆俊等同志也提供了许

多帮助,在此一并致谢。

本书编写过程中参考了国内外大量的文献和研究成果(列举在参考文献中),在此我们对这些作者和研究人员表示真诚的感谢。

本书的出版还得到了国防工业出版社的大力支持,在此表示真诚的谢意。

仿真可信度的评估研究还在发展,许多研究工作还需要不断地创新与完善。尽管我们在编写过程中做了很多努力,但由于水平有限,本书一定存在不少缺点和纰漏,敬请广大读者和专家批评指正。

作 者

2012 年 8 月

于电子信息系统复杂电磁环境效应  
国家重点实验室

# 目 录

|                      |    |
|----------------------|----|
| 第 1 章 绪论             | 1  |
| 1.1 仿真可信度评估理论方法的发展过程 | 2  |
| 1.2 仿真可信度评估的研究意义     | 4  |
| 1.3 影响仿真可信度的主要因素     | 5  |
| 1.4 当前仿真可信度评估工作的难点   | 7  |
| 1.5 仿真可信度的定义         | 9  |
| 1.5.1 常见的仿真可信度与置信度定义 | 9  |
| 1.5.2 本书关于仿真可信度的定义   | 11 |
| 1.6 本书结构             | 12 |
| 第 2 章 仿真模型可信度评估方法    | 14 |
| 2.1 概述               | 14 |
| 2.2 数理统计方法           | 15 |
| 2.2.1 参数估计法          | 15 |
| 2.2.2 经典假设检验法        | 20 |
| 2.2.3 非参数检验法         | 23 |
| 2.2.4 Bayes 方法       | 29 |
| 2.3 动态关联分析方法         | 35 |
| 2.3.1 Theil 不等式系数    | 35 |
| 2.3.2 相关系数法          | 36 |
| 2.3.3 灰色关联分析法        | 39 |
| 2.3.4 改进灰色关联分析法      | 40 |
| 2.3.5 回归分析法          | 42 |
| 2.3.6 系统辨识法          | 50 |
| 2.4 谱分析法             | 61 |
| 2.4.1 经典谱估计法         | 61 |

|            |                              |           |
|------------|------------------------------|-----------|
| 2.4.2      | 最大熵谱估计法                      | 64        |
| 2.4.3      | 小波分析法                        | 68        |
| 2.5        | 本章小结                         | 70        |
| <b>第3章</b> | <b>基于可信度评估特征的模型可信度评估方法分类</b> | <b>71</b> |
| 3.1        | 概述                           | 71        |
| 3.2        | 可信度评估特征的定义和内涵                | 71        |
| 3.2.1      | 基于评估数据的可信度评估特征               | 72        |
| 3.2.2      | 基于评估方法数学/物理本质的可信度评估特征        | 78        |
| 3.3        | 基于可信度评估特征的可信度评估方法分类          | 82        |
| 3.3.1      | 基于校验数据的模型可信度评估方法分类           | 82        |
| 3.3.2      | 基于校验方法本质的模型可信度评估方法分类         | 84        |
| 3.4        | 本章小结                         | 85        |
| <b>第4章</b> | <b>基于虚拟属性划分的仿真系统可信度评估方法</b>  | <b>86</b> |
| 4.1        | 概述                           | 86        |
| 4.2        | 仿真系统可信度评估的实现框架与指导原则          | 87        |
| 4.2.1      | 仿真系统可信度评估的实现框架               | 87        |
| 4.2.2      | 仿真系统可信度评估的指导原则               | 88        |
| 4.3        | 仿真系统可信度评估的评估条件和评估体系          | 88        |
| 4.3.1      | 仿真系统的集合描述                    | 88        |
| 4.3.2      | 属性继承的含义与条件                   | 90        |
| 4.3.3      | 评估子集和评估属性的确定方法               | 92        |
| 4.3.4      | 分解集合的性质与条件                   | 93        |
| 4.3.5      | 分解路径                         | 94        |
| 4.3.6      | 属性分解的实现方法                    | 95        |
| 4.3.7      | 评估体系建立方法                     | 97        |
| 4.4        | 仿真系统可信度评估的评估框架               | 99        |
| 4.4.1      | 评估属性的权值的性质与确定条件              | 99        |
| 4.4.2      | 权值路径                         | 101       |
| 4.4.3      | 相对权值范围                       | 102       |
| 4.4.4      | 绝对权值范围                       | 102       |
| 4.4.5      | 属性重要度                        | 104       |

|              |                             |            |
|--------------|-----------------------------|------------|
| 4.4.6        | 虚拟属性集 .....                 | 105        |
| 4.4.7        | 虚拟属性列 .....                 | 106        |
| 4.4.8        | 权值确定 .....                  | 107        |
| 4.5          | 仿真系统的可信度计算与可信度结果分析 .....    | 113        |
| 4.5.1        | 可信度计算 .....                 | 113        |
| 4.5.2        | 可信分析 .....                  | 115        |
| 4.6          | 本章小结 .....                  | 117        |
| <b>第 5 章</b> | <b>辅助可信度评估的典型数学方法 .....</b> | <b>119</b> |
| 5.1          | 概述 .....                    | 119        |
| 5.2          | 数据判定方法 .....                | 121        |
| 5.2.1        | 数据特征描述方法 .....              | 121        |
| 5.2.2        | 样本分布判定方法 .....              | 122        |
| 5.2.3        | 平稳性判定方法 .....               | 125        |
| 5.2.4        | 独立性检验方法 .....               | 130        |
| 5.3          | 数据清理方法 .....                | 133        |
| 5.3.1        | 趋势项提取与分离 .....              | 133        |
| 5.3.2        | 异常值剔除方法 .....               | 136        |
| 5.3.3        | 平滑滤波 .....                  | 144        |
| 5.4          | 数据转换方法 .....                | 155        |
| 5.4.1        | 数据扩充方法 .....                | 155        |
| 5.4.2        | 插值方法 .....                  | 158        |
| 5.4.3        | 数据变换方法 .....                | 160        |
| 5.5          | 本章小结 .....                  | 165        |
| <b>第 6 章</b> | <b>仿真可信度评估实例及分析 .....</b>   | <b>166</b> |
| 6.1          | 概述 .....                    | 166        |
| 6.2          | 仿真可信度评估软件介绍 .....           | 166        |
| 6.2.1        | 软件开发运行环境 .....              | 167        |
| 6.2.2        | 软件体系结构与系统组成 .....           | 167        |
| 6.2.3        | 软件主要功能 .....                | 167        |
| 6.3          | 信号级雷达仿真系统简介 .....           | 171        |
| 6.3.1        | 系统的主要功能 .....               | 171        |

|           |                        |     |
|-----------|------------------------|-----|
| 6.3.2     | 系统的结构组成 .....          | 172 |
| 6.4       | 信号级雷达仿真系统可信度评估及分析..... | 175 |
| 6.4.1     | 建立系统层次结构 .....         | 175 |
| 6.4.2     | 建立系统可信度评估体系 .....      | 175 |
| 6.4.3     | 仿真模型可信度评估 .....        | 178 |
| 6.4.4     | 权重设定与计算 .....          | 181 |
| 6.4.5     | 仿真系统可信度评估 .....        | 183 |
| 6.4.6     | 系统可信度分析 .....          | 184 |
| 6.5       | 本章小结.....              | 186 |
| 图表索引..... |                        | 187 |
| 参考文献..... |                        | 190 |

# 第1章 绪 论

建模与仿真 (Modeling and Simulation, M&S) 是一门迅速发展起来的新兴学科, M&S 技术具备无破坏性、可多次重复、安全、经济、可控、不受气候条件和场地限制等固有优点。随着 M&S 理论方法和应用技术研究的深入, 以及计算机技术的发展, M&S 已经成为分析、研究各种系统的重要工具, 它不仅用于工程领域, 如机械、航空、航天、电力、电子等, 还广泛用于非工程领域, 如交通管理、生产调度、库存控制、生态环境以及社会经济等。美国国家关键技术委员会于 1991 年将 M&S 技术确定为影响美国国家安全及繁荣的 22 项关键技术之一。美国总统咨询委员会于 2008 年将计算机仿真列为继科学理论和科学实验之后第三种认识客观世界和改造客观世界的手段。

随着科学技术的日益发展, 人类认识、描述、分析和仿真客观世界的能力越来越强。仿真对象由一般系统发展到了复杂系统, 由宏观世界进入到微观世界。系统仿真技术已经广泛应用在工程技术、军事科学、社会经济、生命科学等各个领域, 尤其在新型武器装备研究、开发、试验与评估方面发挥着至关重要的作用。随着计算机技术的发展, 系统建模与仿真技术得到了非常广泛的应用, 正成为一种认识客观世界和改造客观世界的新的的重要手段。

仿真是一种基于模型的活动, 模型是系统仿真的重要部分。仿真的结果是否可信, 一方面决定于模型对系统行为子集特性描述的正确性与精度, 另一方面决定于计算机模型和/或物理模型在实现系统模型时的准确度。只有建立能够准确反映系统内在特性和变化规律的模型, 才能得到准确的仿真结果。只有保证了建模与仿真正确性与可信度, 其仿真结果才具有实际的应用价值和意义。

建模与仿真的校核、验证和确认 (Verification Validation and Accreditation, VV&A) 技术, 很早就受到国内外仿真专家们的重视。20 世纪 70 年代中期, 美国计算机仿真学会成立了模型可信度技术委员会, 负责制定与模型可信度相关的概念、术语和规范。此后美国各种仿真会议、国际自动控制联合会 (IFAC) 世界大会、高性能计算机会议、军事运筹学会议等都安排了仿真 VV&A 的专题讨论。在海湾战争后, 美国国防部为了加强对国防领域建模与仿真的管理, 在 1991 年中期设立了国防建模与仿真办公室, 该办公室公布了有关建模与仿真管理方面的计划, 包括国防系统仿真章程和仿真 VV&A 的国防部指南等。美国弹道导弹防御办公室及海、陆、空各军种都制定了 VV&A 细则, 国家标准局制定了 VV&A 的国家标准。加拿

大建立了国防部合成环境协调办公室,并于2003年5月制定和发布了《建模与仿真 VV&A 指南》的初稿(DND SECO,2003)。该指南是加拿大防御体系中的建模与仿真发展、获得、应用中使用的 VV&A 工具和技术有关的指导书,准备在防御体系里指导校核、验证和确认过程中使用<sup>[1,2]</sup>。

我国对建模与仿真的 VV&A 技术的研究也在逐步深入,已取得了不少成果,其中既有概念性讨论,也有技术方面的研究,还有工程应用。工程研制部门、管理部门以及仿真试验部门对 VV&A 技术尤为重视,并且取得了较大的效益。

美国国防部 1996 年公布的 DoD Instruction 5000. 61《国防部建模与仿真 VV&A》,明确要求其所属的 M&S 研究机构建立校验的校核、验证与确认政策指导小组,以提高 M&S 的可信度。有关校核、验证和确认的国际标准(IEEE IEEE1278.4 等)也于 1997 年公布<sup>[3]</sup>。我国目前虽然还没有关于仿真系统 VV&A 和可信度评估的标准,但随着仿真技术日益广泛的应用、模型校验认知水平的提高以及模型校验相关理论和知识的统一,政府制订出相关的标准和规范指日可待。

## 1.1 仿真可信度评估理论方法的发展过程

随着计算机技术、信息技术和通信技术等相关领域科学技术的发展,仿真技术取得了很大的发展,作为系统仿真研究重要组成部分的可信度评估技术也取得了很大进展。纵观国外可信度评估技术研究的发展历程,可分为以下 3 个阶段<sup>[4]</sup>:

### 1. 20 世纪 60 年代初至 70 年代中期

仿真可信性研究的萌芽阶段。仿真结果的评估工作始于 20 世纪 60 年代, Biggs 和 Cawthorne 对“警犬”导弹系统仿真的评估,是有关仿真结果评估的最早记录。1967 年, Fishman 和 Kiviat 指出评估仿真模型时要包括两个方面:模型校核和模型验证。Mckenny 和 Shrank(1967)提出了模型的有效性和仿真结果的应用相关的观点。Mihram(1972)将模型开发过程分为 5 个步骤,即系统分析、系统集成、模型校核、模型验证和模型分析,首次将仿真可信性分析作为仿真工作的一个有机组成部分。70 年代中期美国计算机仿真学会(Science of Computer Simulation, SCS)组织成立了模型可信性技术委员会 TCMC,其目的是建立一系列与模型可信性相关的概念、术语和规范。该事件是仿真可信性研究的一个重要里程碑,表明该领域的研究已进入规范化和组织化。该阶段提出了很多重要的有关仿真可信性的概念和原则,为后来可信性研究工作的开展奠定了良好的基础。

### 2. 20 世纪 70 年代中期至 90 年代中期

仿真模型的校核、验证技术蓬勃发展阶段。Holmes(1984)提出了确定模型动态特性置信度等级的 CLIMB(Confidence Levels in Model Behavior)方法,并针对导弹系统模型的验证总结开发了一种十分有效的分析工具——随机工具箱,该工具

箱包含的方法有对照比较法、专家评定法、半实物仿真法、CADET 法、Monte Carlo 法、TIC 指数法、数据图法、均值和方差检验法、假设检验法、数据覆盖法、频谱分析法、回归分析法等。Schruben(1980)提出了图灵检验法(Turing Test);Hess(1988)提出了最优时间匹配法来验证实时仿真系统的输出结果。Balci 和 Sargent(1994)综述了模型验证的各种方法并对其进行了分类,主要有静态分析法、动态测试法、约束分析法、理论证明法、图灵测试法、灵敏度分析法、极端条件测试法、统计检验法、主观有效性检验等。Murray-Smith(1995)综述了外部验证的概念和方法,将外部验证的方法归纳为输出数据比较法、系统辨识法、灵敏度分析法和逆系统模型(Inverse Model)方法等。该阶段学术界对仿真模型的校核和验证方法,主要是验证方法进行了深入研究和系统总结,并广泛应用于工程实践,取得了较好的效果。

### 3. 20 世纪 90 年代中期至今

仿真可信性评估标准化和规范化,面向新技术应用和适应新需求挑战的可信性研究萌芽阶段。一方面,各行业各部门纷纷制定自己的 VV&A 手册。以仿真技术发展先进国家为例,美国国防部于 1996 年 11 月提交了《VV&A 建议实施指南》(VV&A Recommended Practices Guide, VV&A RPG),并于 2002 年秋组织各部门对其进行了修订,随之将其推荐为 IEEE 标准;美国陆军部、海军部、空军部、导弹防御机构分别以此为基础,制定了自己的 VV&A 手册,包括概念、原则、过程、方法和文档等;此外,在航空航天、机械工程、核联盟、工程计算领域等也都建立了相应的 V&V 标准<sup>[4-6]</sup>。英、法等西欧国家的 VV&A 标准化研究也紧随其后。2001 年,英法国防研究组织(Anglo-French Defense Research Group, AFDRG)资助了一项 VV&A 框架,对两国间相关领域所遵循的共同性问题进行研究。V&V 的标准化和规范化因其具有简化操作、节省费用和协调沟通等优点,已被日益多样化、规范化和制度化的当今社会所接受。

另一方面,出现了面向新技术应用的可信性研究的萌芽。如 Johns Hopkins 大学针对先进飞行模拟器中人的行为表示进行了验证研究,美国 RAND 公司对多分辨率模型的验证进行了探索研究,West Virginia 大学计算机科学系对自适应软件系统的 V&V 的特点、含义和方法进行了探讨。这些研究通常是结合具体的仿真系统对可信性评估的理论、方法和应用进行探索性研究,并开发了小型的测试与评估工具;但迄今为止还没有形成完整的理论体系。

在我国,仿真可信性研究也得到了充分的重视,其主要思路是在跟踪国外先进评估技术的同时,结合国内仿真工程的实际需要进行有益的研究和探索,所遵循的是一条跨越式发展路线。目前,在仿真评估的理论、原则、方法、工具和应用上均已取得了一系列成果;这些成果的取得通常以特定的仿真系统和技术为背景,如国防科技大学以导弹系统为背景进行了仿真可信性研究和以 HLA 技术为背景进行了仿真系统 VV&A 的理论和方法研究。此外,还启动了仿真评估的标准化进程,如

空军工程大学在建模与仿真术语的规范化方面进行了一些探索性研究;国防科技大学已制定出 DIS 仿真系统 VV&A 的军队标准,并正着手制定 HLA 仿真系统的通用测试标准。

## 1.2 仿真可信度评估的研究意义

随着建模方法的多样化,被仿真系统的日益复杂化和仿真试验难度的加大,系统建模与仿真校核、验证和确认的重要性愈来愈突出,完全有必要对 VV&A 技术和方法进行更进一步的广泛、系统、深入研究。

仿真的可信度评估是伴随着仿真系统的设计、开发、运行、维护整个生命周期过程的一项重要活动,它的重大意义在于可以有效地提高仿真系统的可信度水平和仿真精度,减少由于仿真结果的不准确或错误给分析和决策带来的风险。具体来讲,仿真可信度评估的意义如下:

### 1. 仿真可信度评估工作能够增强应用 M&S 的信心

在 M&S 开发过程中开展校核与验证工作,可以为 M&S 应用于特定目的的可信度评估提供客观依据,从而能够增强 M&S 应用的信心,需要注意的是仿真可信度评估工作是在一定的条件下开展的,为系统的应用目标服务的。

### 2. 仿真可信度评估工作可以减少 M&S 的风险

仿真可信度评估工作可以尽早地发现 M&S 设计开发中存在的问题和缺陷,帮助设计开发人员采取措施,修改模型和软件,可以尽可能地避免由设计开发中存在的错误和缺陷给仿真系统造成的风险和损失。

### 3. 仿真可信度评估工作能够增强 M&S 在未来的可用性

仿真可信度评估工作是与仿真系统的设计、开发、测试、应用的全过程紧密结合的一项工作,可信度评估工作对整个仿真生命周期中的活动都有所记录,可以保留大量有用的有关 M&S 的数据资料,为 M&S 未来的应用提供历史文档。

### 4. 仿真可信度评估工作实际上减少了 M&S 的费用

通过仿真可信度评估工作,可以极早地发现设计开发中的错误,减少由此造成的损失,这会大大超过校验工作本身的开支。此外,仿真可信度评估工作可以为 M&S 在未来的应用提供重要的数据资料,参考文献[7]的研究结果表明,仿真可信度评估工作的费用通常是仿真系统开发费用的 5% ~ 17.8%,一般为 10% ~ 12%。

### 5. 仿真可信度评估工作能够更好地完成系统分析提供潜在的动力

为了实施经济有效的仿真可信度评估工作,必须对所校验的仿真系统和其所仿真的真实系统的情况、M&S 的目标、条件资源限制等问题进行深入的分析研究,这样会有力地促进系统分析工作的开展。

## 6. 仿真可信度评估适应国际标准要求

美国国防部 1996 年 4 月 26 日公布 DoD Instruction 5000. 61《国防部 M&S 的校核、验证与确认》,明确要求其所属的 M&S 研究机构建立相应的校核、验证与确认政策指导小组,以提高 M&S 的可信度。有关校核、验证与确认的国际标准(IEEE1278-4)也于 1997 年公布。我国虽然目前还没有关于仿真系统校验和可信度评估的标准规范,但出台相应的标准规范是大势所趋。

## 1.3 影响仿真可信度的主要因素

对于建模仿真和仿真可信度评估而言,最为关心的问题就是模型是否达到了必要的可信度,参考文献[8-30]整理了影响模型可信度的一些主要因素,我们参照这些分析结论,并结合作者所在单位在仿真可信度研究方面十余年的心得和经验,总结了以下影响仿真可信度的 6 个主要因素。在建模与仿真中,充分考虑这些因素的影响,有望对模型可信度的提高提供帮助。

### 1. 建模过程中忽略了部分次要因素(模型结构的影响)

在建模中,一些因素可能因为对所研究的系统,或对研究的目标影响较小,因而被忽略掉了。但这种忽略在一定程度上具有潜在的危险。

(1) 对系统的影响小到什么情况才可以忽略,并没有明确的评价指标,因此对某个因素是否应该被忽略,在技术上可能存在着分歧,但最后却由于人为的考虑将其忽略了;

(2) 在对模型进行多次修改的过程中,很可能偏离了最初的目标,这时,曾经被忽略的某个因素已经不再可以被忽略;

(3) 有些被忽略的因素不是由于其对系统的影响小到可以忽略,而是因为由于求解数学模型的数值方法上的限制,比如求解太困难甚至不可解,求解的代价太高等,从而被折中而忽略掉。

### 2. 模型运行数据(参数等)的确定失误(模型参数的影响)

仿真模型的初始状态(包括模型参数、运行时的初始数据)对仿真的输出有着直接的影响,特别是在仿真时间很短的情况下,输出结果会有较大的偏差。因此,模型参数的确定要参考原型系统状态以及模型要求,减少人为因素的影响。模型运行的初始数据可以从建模过程中使用的原始数据中选用,也可以对这些原始数据重新规划后加以使用。

### 3. 随机数据的模拟不准确(模型中随机因素模拟的影响)

一般情况下,仿真模型中含有一定数量的随机变量,这些随机变量都是遵循所要求的概率分布,这些概率分布是通过采集到的大量原型系统数据进行分析,或是通过从原理上分析这些随机因素的产生背景以后来确定的,这些随机变量所遵

循的概率分布,甚至于分布参数的正确与否直接影响着模型的质量。一般情况下,只要对原型系统进行深入的原理分析,或者是采集到足够多的数据,严格按科学的方法来分析,则可以确定合适的概率分布和分布参数。但在实际建模研究过程中,由于各种原因,对于原型系统中随机因素的分析很难深入进行,或者由于数据的采集十分困难,因此对于这些随机变量的模拟存在着一定的偏差,这些偏差在模型运行过程中被传递和放大,最终导致模型的运行结果出现偏差,从而影响到模型的可信度。

#### 4. 仿真输出结果的统计误差(可信度评估所用数据的影响)

对于模型的可信度的评估(或验证)工作,很多是通过对仿真输出结果和原型系统输出结果进行处理来实现的,大多数都要求有较大的数据量才能得出比较科学和准确的可信度评估结论。由于各种原因,在实际仿真可信度评估工作中,导致可供处理比较的数据量比较少,甚至数据只能反映系统的某个侧面,而不能全面反映系统的状态,这样运用仿真可信度评估方法得出的可信度结论,其准确性就会受到很大的影响。换言之,就是由于进行仿真可信度评估时样本量的不足(甚至是数据不全面),导致了可信度的评估结论与模型的实际可信度之间有一定的偏差。也就是说,可能模型本身可信度较高,但由于样本量的不足,评估的可信度却不高;更危险的是,评估结果表明,仿真模型输出与原型系统输出是一致的,有着较高的可信度,但是由于样本量的不足,这仅仅是小样本情况下的模型输出与原型系统输出偶然巧合。

#### 5. 仿真可信度评估方法与模型和数据的不适配(可信度评估方法误用的影响)

事实上每种仿真可信度评估方法都有自己的适用范围,例如不同方法对于评估所用的数据有不同的要求,这样如果某类模型采集的数据不满足该仿真可信度评估方法,则该方法在这种情况下(或者是对于这类模型)是不适配的;同时,每种仿真可信度评估方法也有自己的数据或物理的意义,如 TIC 不等式系数法评价的是数据间的距离,而灰色关联法评价的是数据间的趋势,这样对于同一个仿真模型,选用不同的可信度评估方法则可以得到不同的评估结果,但只有评估方法的本质意义与模型的用途相适配时,该评估结果才是有意义的。因此这便提醒仿真可信度评估人员,要充分理解每种方法的适用前提和使用要求,不能盲目乱用和滥用仿真可信度评估方法。

在实际的仿真模型可信度评估工作中,很多的仿真模型可信度评估人员在选用仿真模型可信度评估方法时,并没有考虑到方法与模型和数据的适配性,这样所得到的评估结果与模型的实际可信度之间就会有一定的偏差。这种偏差的危害性在以上已经有了比较详细的阐述。本书的第3章将就这个问题,对于每种模型可信度评估方法建立其数据特征和方法本质特征,以此来引导仿真可信度评估人员进行仿真模型可信度评估时针对模型和数据的实际情况来选择适配的评估方法。

## 6. 通过可信度评估的子模型的误差累积(子模型误差累积效应的影响)

在给定的应用背景下,每一个通过了可信度评估的子模型,都有着足够的可靠性。但是,这并不意味着整个模型的应用是可靠的。这是因为,每个子模型允许的误差会产生累积,严重时将达到整个模型或仿真无法接受的程度,这是在 M&S 过程中经常被忽视的一个问题。因此,即使每个子模型都通过了可信度的评估,由它们组合而成的整个模型仍然需要重新进行可信度的评估。本书第 4 章将就仿真系统的可信度评估问题,建立一种新的仿真系统可信度评估方法。

在上面所分析总结的影响仿真可信度的 6 类主要因素中,前三类是模型本身的问题,是在模型开发和运行当中产生的,应该由模型的开发者、仿真系统的执行者来查找问题并尽力解决以提高其可信度水平。第四类因素是由于用于可信度评估的数据的问题所带来的影响,仿真可信度的评估分析人员应与仿真系统的开发者、使用者一起,讨论分析数据是否全面,能否全面反映模型的功能和特性。最后两类因素,是最需要仿真可信度评估人员注意的,它们所导致的评估结果的不准确会给仿真应用带来难以发现但可能是无法估量的后果。本书的第 3 章和第 4 章就是针对这两类对于方法的误用所引起的可信度评估结果的不准确,提出了一套新的解决的办法。

## 1.4 当前仿真可信度评估工作的难点

模型的可信度评估工作是仿真系统开发与建设中难度很大的一个环节,同时也是极为关键的一个环节,其难点主要表现在以下几个方面。

### 1. 寻找合适的模型可信度评估方法需要丰富的经验和技巧

实际系统是千差万别的,要想找到一种普遍适用的模型可信度评估标准和具体方法是不可能的,也是不现实的。即使是针对同一系统的仿真问题,由于研究的目的和侧重点不同,也必须采用不同的验证标准和方法。例如,把验证城市交通系统的仿真模型的方法用于系统仿真模型的验证是行不通的,反之亦然。对同一型导弹武器系统的仿真工程来说,其系统总体仿真模型的可信度评估方法与标准,也不同于其部件的模型可信度评估方法与标准。这就要求我们在进行模型可信度评估时,既要看到不同的仿真系统中的共性问题,又要注意各自仿真系统的特殊性,洞察系统的物理本质,抓住问题的主要矛盾,找出合理的可信度评估方法和解决方案。这就需要具有建模与模型验证方面的丰富经验和技巧。

本书的第 3 章定义并建立可信度评估特征,通过可信度评估特征联系起仿真可信度评估方法与待评估模型、评估数据,可以指导仿真可信度评估人员(可能是具有丰富经验的人员)选择合适的可信度评估方法。

## 2. 分析影响模型可信度的多种因素繁琐且复杂

如 1.3 节所分析的,模型的可信度受到多方面因素的影响,首先是模型本身的因素,一是模型的结构,二是模型的参数,三是其中随机因素的模拟。结构往往代表某一类模型的共性,而参数和随机因素的加入,体现的是模型的个性。这两方面是模型能否代表原型的决定因素,是内因。因此,在进行模型可信度评估时,要首先关注它们的正确性与准确性。其次是可信度评估所用数据的影响,这是模型可信度评估的外部因素。这要求我们所用的数据必须是充分的且可信的<sup>[31,32]</sup>。

正因为存在着多种影响模型可信度的因素,我们在进行模型可信度评估时必须分清每种因素的影响,客观、合理地评价模型的可信度。这是一个繁琐且复杂的工作。

## 3. 模型可信度评估过程中往往存在大量的测试与计算

模型的可信度评估工作在很多情况下与仿真模型的测试与评估工作结合在一起,需要完成大量的测试工作,这对于时间和经费的开销都比较大。另外,在模型可信度评估的算法中往往存在着复杂的、大量的计算,同样会使模型验证工作付出较高的代价。如何合理、高效地折中时间、经费以及模型可信度评估工作,需要科学的统筹和决策<sup>[33]</sup>。

## 4. 系统级、复杂大系统级的模型可信度评估难以实现

如 1.3 节所分析的,即使是每个子模型都通过了可信度评估,具有足够的可靠性,但是由这些子模型组成的分系统、系统,其可信度仍然是需要重新评估的,对于再由分系统、系统组成的复杂大系统更是如此。目前系统级、复杂大系统级的模型的验证大多是专家经验评估、层次分析、模糊评判等方法。这些方法,第一需要借助领域专家的知识和经验,广泛收集他们的评估意见,花费的代价比较高,执行的难度也比较大<sup>[20,28]</sup>;第二不可避免地引入了主观影响因素。因此如何合理地建立系统、复杂大系统的可信度评估指标体系,建立客观的可信度评估方法,是一个需要长期研究和探索的技术难题。

本书的第 4 章就系统级的仿真可信度评估问题进行了一些探讨,提出了可信度评估框架、虚拟属性集和虚拟权重划分等概念,研究建立了一种比较具有客观性和可操作性的仿真系统可信度评估及可信度分析理论方法。

## 5. 原型系统没有输出或难以采集到数据使常规的可信度评估方法难以应用

有些原型系统,如环境系统、空间对抗系统等,难以在实际系统上做试验,或者难以采集其输出数据,所以就得不到实际系统的输出行为,这样就难以给出一个评价模型系统的客观标准;有些原型系统,如导弹武器系统,尽管可以通过打靶试验获得原型系统的一些特征数据,但这些参考数据极其有限,就全面评估来说数据不够充分。在这些情况下,常规的模型可信度评估方法都难以适用。因此研究建立基于小样本或零样本情况下的模型可信度评估方法,乃至基于结构的模型可信