

中国工程科技论坛

现代建模与仿真技术 及应用进展

● 中國工程院

高等教育出版社

中国工程科技论坛

现代建模与仿真技术及应用进展

Xiandai Jianmo Yu Fangzhen Jishu Ji Yingyong Jinzhan



高等教育出版社·北京

内容提要

本书是中国工程院“中国工程科技论坛”系列丛书之一。近年来，系统仿真方法、技术及其应用研究吸引了越来越多的国内外学者的关注，研究内容也越来越广泛，已成功地应用于航空航天、信息、生物、材料、能源、先进制造等高新技术领域以及工业、农业、商业、教育、军事、交通、社会、经济、医学、生命、生活服务等几乎社会各行业的系统论证、试验、分析、维护、运行、辅助决策及人员训练、教育等。目前，新一代建模与仿真技术正在向以“数字化、虚拟化、网络化、智能化、服务化、普适化”为特征的现代化方向发展。本书围绕“现代建模与仿真技术及应用进展”的主题，对建模与仿真的理论基础、仿真发展的顶层技术框架、建模与仿真的发展思路等内容进行了深入探讨，有助于凝聚对现代建模与仿真发展的共识，使系统仿真尽快成长为成熟学科，从而更加有力地推动仿真技术的全面应用。

本书适合相关领域的研究人员、技术人员、高校师生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

现代建模与仿真技术及应用进展 / 中国工程院编著.
-- 北京 : 高等教育出版社, 2018.5
ISBN 978-7-04-049593-5

I. ①现… II. ①中… III. ①系统建模-研究 ②系统仿真-研究 IV. ①N945.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 070260 号

总 策 划 樊代明

策划编辑 黄慧靖

责任编辑 张 冉

封面设计 顾 斌

责任印制 韩 刚

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120
印 刷 北京汇林印务有限公司
开 本 787mm × 1092mm 1/16
印 张 6.75
字 数 110 千字
购书热线 010-58581118
咨询电话 400-810-0598

网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.hepmall.com.cn>
<http://www.hepmall.com>
<http://www.hepmall.cn>
版 次 2018 年 5 月第 1 版
印 次 2018 年 5 月第 1 次印刷
定 价 60.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题，请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究
物 料 号 49593-00

编辑委员会

主 任

李伯虎

副 主 任

王子才 陈左宁 赵沁平 任南琪

委 员

戴	岳	范文慧	胡晓峰	纪志成	李国雄
刘	金	马世伟	邱晓刚	吴云洁	杨 明
		张 霖	张志利	赵 民	

编辑人员

刘诗璇 赵 罡

目 录

第一部分 综 述

综述	3
----------	---

第二部分 主 题 论 文

复杂系统建模与仿真的思考	肖田元	7
面向复杂系统仿真的模型工程	张 霖 等	14
复杂格斗建模的网络思维	谭东风	25
Cyber 空间与体系仿真——美国“空海一体战”带来的挑战	胡晓峰 等	35
赛博武器装备体系仿真技术探析	吴 浩 等	44
面向公共安全事件的人工社会模型体系结构	樊宗臣 等	55
无基础设施 WiFi 室内定位算法设计	王小建 等	65
新型作战空间建模仿真实践探索与体会	司光亚 等	74
边缘计算概述	钱广昊 等	84
附录 主要参会人员名单		99
后记		101

第一部分

综 述

综 述

建模与仿真是一门以建模理论、计算方法、评估理论为基本理论,以计算机技术、网络技术、图形图像技术、多媒体技术、软件工程、信息处理、自动控制及系统工程等相关技术为支撑的综合性交叉科学。建模与仿真技术以计算机系统、物理效应设备及仿真器为工具,根据研究目标,建立并运行模型,对研究对象进行认识与改造,是工业化社会向信息化社会前进中产生的信息类科学技术。

建模与仿真通过构造既能反映系统特征又能符合系统研究要求的模型,并在该模型上对所关心的问题进行研究,揭示已有系统和未来系统的内在特性、运行规律、分系统之间的关系并预测未来。建模与仿真技术极大地扩展了人类认知世界的的能力,可以不受时空的限制,观察和研究已发生或尚未发生的现象,以及在各种假想条件下这些现象发生和发展的过程。它可以帮助人们深入到一般科学及人类生命活动难以到达的宏观或微观世界中去进行研究和探索,从而为人类认识世界和改造世界提供全新的方法和手段。系统仿真方法、技术及其应用已扩展到人类活动的大部分领域。

近年来,系统仿真方法、技术及其应用研究吸引了越来越多的国内外学者的关注,研究内容也越来越广泛,已成功地应用于航空航天、信息、生物、材料、能源、先进制造等高新技术领域和工业、农业、商业、教育、军事、交通、社会、经济、医学、生命、生活服务等几乎社会各行业的系统论证、试验、分析、维护、运行、辅助决策及人员训练、教育等。目前,新一代建模与仿真技术正在向以“数字化、虚拟化、网络化、智能化、服务化、普适化”为特征的现代化方向发展。

2015年7月24—26日,由中国工程院主办,中国工程院信息与电子工程学部、中国系统仿真学会和空军哈尔滨飞行学院共同承办的第210场中国工程科技论坛——“现代建模与仿真技术及应用进展”在哈尔滨召开。中国工程院副院长陈左宁院士出席了论坛并致开幕词,中国系统仿真学会理事长赵沁平院士、空军哈尔滨飞行学院院长吴惠明分别致辞。李伯虎院士主持开幕式,来自中国工程院的6位院士及国内仿真领域的专家出席了此次论坛,参加论坛的人数达300余人。论坛主席由中国工程院赵沁平院士担任。

会上,来自仿真领域的5位院士和2位专家为大家呈现了精彩的报告。中国人民解放军总参谋部第56研究所陈左宁院士作了题为“面向复杂系统模拟仿真的高性能计算机研究”的大会报告;哈尔滨工业大学王子才院士作了题为“空

间环境仿真”的大会报告;北京航空航天大学赵沁平院士作了题为“虚拟人体:虚拟现实的终极目标”的大会报告;航天科工集团公司二院李伯虎院士作了题为“智能制造中的建模与仿真技术研究”的大会报告;哈尔滨工业大学任南琪院士作了题为“中国城市水可持续发展对策”的大会报告;哈尔滨工程大学姚郁教授作了题为“飞行器末制导及其仿真中的几个研究热点与挑战”的大会报告;国防科技大学邱晓刚教授作了题为“面向社会性突发事件的建模与仿真平台研究”的报告。

本次论坛围绕“现代建模与仿真技术及应用进展”主题,通过深入广泛研讨,有助于凝聚对现代建模与仿真发展的共识,提出可行的发展思路,建立建模与仿真的理论基础,形成更加有利于仿真发展的顶层技术框架,使系统仿真尽快成长为成熟学科,从而更加有力地推动仿真技术的全面应用。各位参会专家对建模与仿真技术的发展各抒己见,踊跃发言,最终大家求同存异,取得了圆满的成果。

第二部分

主题论文

复杂系统建模与仿真的思考

肖田元

清华大学自动化系

摘要:复杂系统的本质特性是不确定性、适应性与涌现性。不确定性是复杂系统的固有特性,适应性是复杂系统演化的动力,涌现性是系统性质发生相变产生的新性质。对复杂系统建模来说,基于强还原论或强整体论的建模思想都是不可取的。系统论是复杂性科学研究的基础,系统论不执着于是否能“分割”及如何“分割”,而是注重由实体转向过程、由存在走向演化,使模型具有变结构的演化能力。基于系统论建模的仿真是复杂性研究最基本的工具,仿真可根据相似性对基于还原论的模型进行验证,通过基于演化机制的仿真以达到整体论模型的预测。

关键词:复杂系统;不确定性;适应性;涌现性;还原论;整体论

一、引言

对广泛领域的复杂性问题进行科学研究大大促进了建模与仿真技术的发展。由美国国家科学基金、能源部、国防部、NASA 等多家单位共同提交的报告中,明确提出利用先进信息技术研究复杂系统仿真问题。*International Assessment of Research and Development in Simulation-based Engineering and Science*^[1]一书中提出了“基于仿真的科学与工程”的概念,复杂系统卓越中心开放网络(Open Network of Centers of Excellence in Complex Systems)也视仿真为复杂系统科学必须关注的核心问题,仿真已经成为研究复杂系统的基本途径。在国内,在 2004 年 9 月《系统仿真学报》百期纪念特约专家论坛上,李伯虎等^[2]、王正中^[3]、王子才等^[4]均发表了关于复杂系统仿真的论文,分析并论述了仿真在复杂系统研究中的作用与地位。

然而,面对复杂系统的不确定性、适应性、涌现性等一系列新行为、新性质、新特征,能否对其进行建模、采用什么方法进行仿真、仿真结果是否可信等诸多问题目前在学术上还存在较大分歧和争论。面对复杂系统控制难、评估难和预测难等问题,现有的仿真科学理论体系、方法体系是否能满足复杂系统研究的需

要,也亟须在实践过程中进一步加以思考和拓展。

为此,中国系统仿真学会以“复杂系统建模仿真中的困惑和思考”为题,申办了2011年中国科协第58期新观点新学说学术沙龙,对相关问题进行了探讨,主要包括:复杂系统对仿真基础理论有何影响,相似性理论是否仍然适用;复杂系统的建模仿真问题,涌现性、不确定性、自组织适应性等是否可以建模仿真;复杂系统仿真需要解决哪些问题,可信性、VV&A、仿真实验等问题如何处理;等等。

笔者在该研讨会上主要就两个问题提出了一些看法:①传统的主要基于还原论的建模思想可否用于不可分解还原的复杂系统;②建立在相似理论基础之上的仿真可否用于对初始条件敏感、系统结构动态演化、行为特性相变出现涌现的复杂系统。本文基于笔者会上的发言加以整理、充实,供同行们参考,不当之处,期望给予批评与指正。

二、如何认识复杂系统

关于复杂系统的定义有许多,一类是一般性定义,一类是从学科角度加以定义。对于一般性定义,这里给出Wikipedia(维基百科)和百度百科上的定义如下:

A complex system is a system composed of interconnected parts that as a whole exhibit one or more properties (behavior among the possible properties) not obvious from the properties of the individual parts.

——Wikipedia

具有来自不同标度层次的变量结构,或者相互之间有差别的大量单元构成的动态系统。通常表现出复杂性,但也可能出现简单性。

——百度百科

对于从学科角度的定义,这里给出两个典型的学科定义。我国系统科学的奠基人钱学森先生的定义是:“对于一个系统,根据组成子系统以及子系统种类的多少和它们之间的关联复杂程度,可分为简单系统、简单巨系统和复杂巨系统。其中,子系统种类很多并有层次结构,且关联关系很复杂的,称为开放的复杂巨系统(或简称复杂系统)。”^[5]而复杂性科学的定义是:“复杂系统是中等数目的具有智能性、自适应性的主体基于局部信息做出行动的系统。”

实际上,复杂系统是一个很难定义的系统,因为,迄今为止,对于复杂系统主要特征的描述也是众说纷纭。例如Wikipedia的描述为:difficult to determine boundaries(边界难定)、may be open(开放)、relationships are non-linear(非线性)、relationships contain feedback loops(有反馈)、may be nested(嵌套)、may have a

memory(有记忆)、dynamic network of multiplicity(动态网络多样性)、may produce emergent phenomena(涌现)、cascading failures(故障连锁)等。百度上给出的描述则为:非线性形成机制,可以数学描述,但难以长期预测(混沌动力学);并行循环因果(各个子系统各种反馈形成的循环因果),难以用演绎推理进行证明,处于不断的动态演变和创新的状态(涌现特征),难以还原,难以重复实验(依赖于初始条件,很难重复)等。

笔者力图从复杂系统的行为属性、行为动力与行为结果三个角度给出对复杂系统的描述。

复杂系统的行为属性特征是不确定性。不确定性是复杂系统的固有特性。开放性、边界难以确定、非线性、随机性、模糊性、嵌套、循环因果、并行反馈、动态网络多样性等都可能产生不确定性。

复杂系统的行为动力特征是适应性,包括自组织、自适应、自决性、记忆性等。适应性是复杂系统演化的动力。

复杂系统的行为结果特征是可能产生涌现性,包括个体无序、总体有序,故障连锁、蝴蝶效应等。涌现性是系统性质发生相变产生的新性质。

因此,复杂系统可以主要用不确定性、适应性、涌现性来表征。

三、还原论、整体论、系统论

仿真是基于模型的,核心的问题是如何使模型具有复杂系统的本质特征,因为模型不可能与实际系统完全相同,如果相同,就不叫模型了,所以是其本质特征,这就引发了所谓“能否建模”继而隐喻“能否仿真”的问题。

大家都知道,建模基本上有两种方法,一是基于还原论,二是基于整体论。钱学森先生认为,关于开放的复杂巨系统,由于其开放性和复杂性,我们不能用还原论的办法来处理它,不能像经典统计物理以及由此派生的处理开放的简单巨系统的方法那样来处理。王飞跃也认为,此类系统的结构不明确、边界不确定,还原论方法往往难以刻画系统部分之间的相互关系^[6]。

为什么不能用还原论方法对复杂系统建模?这里,我们需要进一步分析还原论与整体论的哲学思想。

还原论是把高级运动形式还原为低级运动形式的一种哲学观点。它认为现实生活中的每一种现象都可看成是更低级、更基本的现象的集合体或组成物,因而可以用低级运动形式的规律代替高级运动形式的规律。其核心理念在于“世界由个体(部分)构成”。

强还原论认为部分代表整体,把一切都归为部分。世界是由基本粒子等“宇宙之砖”以精巧的方式构成,高层次的复杂对象由较低层次的简单构件组装而

成。只要我们掌握了部分的特性就可以得出整体特性,对高层次事物的掌握可通过对低层次事物的认识来实现。强还原论在方法论上忽略了部分与整体间的联系,甚至认为我们只能认识部分,或者认为部分本身就是世界的本质。显然,强还原论的确难以满足“不确定性、适应性、涌现性”建模的需要。

那么整体论^[7]能否用于复杂系统建模呢?整体论认为,系统的分解将永远丢失很多系统全局的性质,任何一个系统的属性不能被部分属性所决定。系统的整体不等于部分之和,整体与部分、部分与部分之间存在一种辩证的对立统一的关系。整体论强调系统的整体性,但缺乏实现量化的普适方法。

整体论认为,分割必须是对同一实体的分割,分割后的部分必须是同质的,这样才能保证由部分上升到整体的逻辑可能。这种分割的同一性、各部分的同质性要求表明:整体论方法的实质是基于实体论之上的构成论,它难以将演化纳入其理论内核。

美国学者 D. C. 菲立普总结出三类整体论^[8]。整体论 I:整体不等于部分之和,整体的各组成部分具有紧密的内在联系,任何分割都会损害这些联系。整体论 II:对整体的研究应以整体为研究对象,使用整体的专门术语与理论。整体论 III(强整体论):对一个整体,我们不能根据对部分的研究获得对整体的完全解释,因为分割已损害整体,分割后的整体已不再是原来的整体。

那么复杂系统建模与仿真的困难在哪儿呢?这就是所谓“分割困惑与演化难题”。还原论与整体论争论的焦点是:如果分割必定会损害整体,我们是否还可以依据分割后的部分来认识整体?弱的还原论与弱的整体论在此并无本质区别,它们都基本能接受论断 I 与论断 II。

应该承认“一分为二”的哲学思想具有普适性。如果世界是不可分的,那么也就是不可认识的。力图彻底抛弃还原论方法、以整体论方法取而代之的思想是无益的,也是有害的。当然,实体分割后若完全忽略原本存在的联系也是有害的。因此强还原论与强整体论是不可取的。

还原论和整体论各有各的优势,两者的关系也不应是非此即彼的,而是既有区别又相互补充的,两者辩证统一产生了系统论^[9]。正如钱学森先生所言,“系统论是还原论与整体论的辩证统一”。拘泥于还原论,认识是局部的、零碎的、片面的;拘泥于整体论,没有系统的精细结构描述,对整体的认识只能是笼统的、直观的、猜测性的,也无法满足科学性。

“分割困惑”是指一个复杂系统的整体行为不可能通过对其部分行为的单独分析而完全确定,即“不可分”。复杂系统不可分的特征并不应导致否定还原的方法,在“可行还原”的基础上,可对系统整体行为进行“整体逼近”。

“演化难题”是指一个复杂系统的整体行为不可能预先在大范围内完全确

定,即“不可知”。显然,如果其局部行为不可知的话,则整体行为无法确定。但是,如果知其局部行为,通过系统演化过程中各阶段的“短期”行为迭代分析、众多局部行为的恰当综合,可达到演化过程分析的效果,实现对全局行为的预估。

系统论研究的核心不再是整体由何构成,而是演化过程如何生成,因此系统论也称为生成论。复杂性科学研究不再执着于是否能“分割”及如何“分割”,而是由实体转向过程、由存在走向演化。我们对世界的理解也应由还原论的装配式世界向自组织的、演化的世界转变。

四、复杂系统建模与仿真

那么,复杂系统应采用什么研究方法呢?当然,研究方法首先应该是科学的。传统上,科学方法是指:① 可受控试验,② 可重复结果。例如传统的适用于简单系统的“理论”方法、“实验”方法,但是其难以用于复杂系统,因为复杂系统往往是无法重复的。

然而,基于人工系统(模型)的计算实验——仿真,是既可“受控试验”又可“重复结果”的研究方法。实际上,圣菲研究所是基于仿真才发现在有序和混沌之间的变换关系,进而提出复杂性科学,并将仿真作为从事复杂性研究的最基本工具,用计算机模拟相互关联的繁杂网络。钱学森先生从系统科学的角度开展的研究,从定性到定量的综合集成研讨厅^[10],最终也是通过一种交互式分布仿真环境的支持开展研究。

那么,复杂系统的建模和简单系统的建模的主要差别在何处?首先,可采用整体论建模,它本质上是一种 Top-Down 方法学,可以先定义整体结构与流程,根据研究的目标逐次分解,在分解时定义其相互作用。其次,还要采用还原论建模,这本质上是一种 Bottom-Up 方法学,从行为产生的基本机理入手构造人工对象,定义基本单元,然后考虑其相互作用而成为一个系统(整体)。更为重要的是,要实现演化动力学建模。复杂的行为并非一定出自复杂的基本结构;相反,复杂的行为往往是从极为简单的元素群中演化出涌现结果。从对象的互动过程生成行为模式,获得“混沌的边缘”的系统行为模型,这需要用诸如幂律(Power Law)、遗传规则、自组织临界性(self-organized criticality)等方法建模,使得模型具有演化的变结构能力。具有演化能力的元模型、智能体(agent)方法是研究的热点。

复杂系统的仿真和简单系统的仿真的主要差别在何处?首先,需要重新认识复杂系统与其对应的人工系统(仿真系统)的关系。

对简单系统仿真来说,多数情况下,所研究的实际系统是唯一的现实存在,仿真结果必须尽可能真实准确地逼近其实际行为,这是任何仿真都应当遵守的

基本理念。实际系统成了唯一的参考和标准,即所谓的“单一世界”观。

然而,对于许多复杂系统,特别是涉及社会与人的复杂系统,其行为不能预测,无法用来作为检验模型成立与否的唯一参照和标准,如生命的“多重现象”、社会中“多重社会”、天文宇宙理论和实验观察所支持的“平行宇宙”等。这表明,复杂系统仿真时应采用“多重世界”的观点。

复杂系统模型本质上是实际复杂系统一种可能的替代的“人工现实”,也是复杂系统的一种可能的“实际”;实际复杂系统也可视为人工系统的一种“实现”,“实际”也是“模型”的一种。两者的行为可能“不同”但却可能“等价”。这就是复杂系统仿真的“多重世界”观^[11]。

复杂系统“仿真”的内涵是:“仿真”在部分时段或部分区域(空间)上应满足相似性(行为特性、作用规则、演化流程等),在整体上则应是预测性,即通过人工系统运行来揭示相应复杂性系统的运行规律。“仿真”追求的不只是“模仿真实”,还包括研究或预测人工系统在受控条件下呈现出真实复杂系统实现的可能性。从这个意义上讲,仿真是还原论与整体论建模的桥梁,仿真对基于还原论的模型进行验证(相似性),对基于演化机制的仿真以达到整体论模型的预测,这就是基于系统论的建模与仿真。

五、结 语

不确定性是复杂系统的固有特性,适应性是复杂系统演化的动力,涌现性是系统性质发生相变产生的新性质。

复杂性系统建模的核心是如何使模型具有复杂系统的本质特征。强还原论与强整体论都是不可取的。系统论是还原论与整体论的辩证统一,是弱还原论与弱整体论相结合。系统论的核心问题不再是研究整体如何构成,而是演化过程如何生成,具有演化能力的元建模与智能体建模是当前研究的热点。

复杂性系统仿真的理论基础是,除了传统的模型理论、相似理论外,还需要演化动力学理论的支持,演化仿真是实现系统论建模方法分析的关键。

复杂性系统仿真主要采用综合集成研讨厅、平行仿真等模式,基于演化的复杂系统的建模与仿真方法学亟待发展。

参 考 文 献

- [1] WTEC. International assessment of research and development in simulation-based engineering and science[M]. 2009.
- [2] 李伯虎,柴旭东,朱文海,等. 现代建模与仿真技术发展中的几个焦点[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(9): 1871-1878.