



中国科协学会学术部 编

复杂系统建模仿真中的 困惑和思考

新

观点新学说学术沙龙文集

58



中国科学技术出版社
CHINA SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

图书在版编目 (CIP) 数据

复杂系统建模仿真中的困惑和思考/中国科协学会
学术部编. —北京: 中国科学技术出版社, 2012. 3

(新观点新学说学术沙龙文集; 58)

ISBN 978 - 7 - 5046 - 6008 - 4

I. ①复… II. ①中… III. ①系统建模 - 研究
IV. ①N945. 12

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 023099 号

选题策划 赵 晖
责任编辑 赵 晖 夏凤金
封面设计 照 心
责任校对 韩 玲
责任印制 张建农

出 版 中国科学技术出版社
发 行 科学普及出版社发行部
地 址 北京市海淀区中关村南大街 16 号
邮 编 100081
发行电话 010 - 62173865
传 真 010 - 62179148
投稿电话 010 - 62103182
网 址 <http://www.cspbooks.com.cn>

开 本 787mm × 1092mm 1/16
字 数 200 千字
印 张 8
印 数 1 - 2000 册
版 次 2012 年 6 月第 1 版
印 次 2012 年 6 月第 1 次印刷
印 刷 北京金信诺印刷有限公司

书 号 ISBN 978 - 7 - 5046 - 6008 - 4/N · 154
定 价 18.00 元

(凡购买本社图书, 如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责调换)
本社图书贴有防伪标志, 未贴为盗版

倡导自由探究

鼓励学术争鸣

活跃学术氛围

促进原始创新

序 言

进入 21 世纪以来，社会发展和科学研究所面临的复杂问题越来越多，分析解决这些问题的需求也越来越迫切。对复杂系统的研究方法正在经历由传统的分解还原和解析计算方法，向强调整体综合集成、演化分析和科学实验方法的转变，而这个转变将对我们理解和研究复杂系统的思维方法产生重大的影响。

在这个方法论的转换过程中，建模与仿真作为一种通用性、战略性和支撑性的科学方法，其地位和作用也更加突出和显著。然而不可否认的是，由于现实问题复杂性的增加，对复杂系统的建模和仿真尚存在着一系列从基础理论到技术方法所需要重点解决的难点问题，比如复杂系统建模仿真中的相似性理论问题、整体涌现性和演化不确定性的建模与仿真问题、复杂系统建模与仿真的支撑技术与工具问题，以及复杂系统仿真的可信性评估问题等。这些问题对传统的建模与仿真的理论、方法和技术提出了极大的挑战，同时也是现代建模与仿真科学与技术进一步发展的机遇。

由中国科协举办的新观点新学说学术沙龙第 58 期就聚焦在“复杂系统建模仿真中的困惑和思考”这一主题上，围绕复杂系统建模仿真实理论研究和应用实践中所遇到的问题展开研讨，也是对第 8 期和第 37 期关于“仿真是信息时代认识和改造实践的第三种方法吗”和“仿真是基于模型的实验吗”两期沙龙活动的深入和延续。本次沙龙活动共划分为三个主题单元：

第一单元，复杂系统对仿真基础理论的影响，相似性理论仍然适用吗？还会有哪些性质发生变化？

第二单元，复杂系统特性的建模仿真问题，涌现性、不确定性、自组织适应性等可以仿真吗？

第三单元，复杂系统仿真需要解决哪些问题，可信性、VV&A、仿真实验及仿真手段与工具等问题如何解决。

在现场研讨中，参加本次沙龙的近 30 位专家针对这三个主题畅所欲言、踊跃交流，甚至激烈辩论。在自由、活跃但不失严谨的学术气氛下，老中青

专家的不同观点相互碰撞交锋，形成了许多创新性强的学术观点，取得的成果归纳起来主要表现在如下几个方面：

第一，进一步加深了对复杂系统的理解。复杂系统指的是一类具有系统组成关系复杂，具有自组织适应性、不确定性和涌现性等特点的系统。正确地理解复杂系统特性，是复杂系统建模仿真的基础。

第二，探讨了复杂系统建模仿真中的关键问题。由于复杂系统存在的适应性、不确定性及涌现性等特点，对“仿真建模的理论与技术”、“建模与仿真的支撑技术与系统”、“建模与仿真应用工程的理论与技术”等方面均提出了较大挑战。

第三，探讨了复杂系统建模仿真的技术途径。对复杂系统单纯运用还原论、整体论对复杂系统进行全局建模，是有局限性的。基于复杂网络、基于Agent的建模方法是复杂系统建模目前可行的途径。

第四，探讨了复杂系统建模仿真的支撑技术。要重视发展高效能建模仿真技术与系统，它是融合高性能高效能计算技术和建模与仿真技术为一体的一类新建模仿真技术与系统，其研究内容包括：系统体系结构、复杂系统高效能仿真语言、软件支撑技术、海量数据管理技术及云仿真技术等等。另外，“模型工程”也是一项值得探讨与研究的理论与方法。

从研讨成果来看，本期沙龙达到了中国科协倡导的鼓励创新、培养创新人才的目的。本文集是对本期沙龙各位专家发言的汇编，未作大的改动，一些在会议上尚存争议的观点我们也将其收录文中，希望能对读者有所启发，以促进更为深入和广泛的探讨。可以说，这次沙龙活动将是我们开展复杂系统建模仿真研究的又一个新的起点。

最后，谨代表承办方感谢中国科协的大力指导和支持，感谢各位与会专家和新闻界朋友的热情参与和奉献，感谢沙龙组织委员会同志们为本期沙龙成功举办所作的辛勤而有效的努力。

李伯虎 刘继平

2011年10月25日

目 录

复杂系统建模仿真的困惑和思考	胡晓峰 (3)
仿真是还原论与整体论建模的桥梁	肖田元 (11)
相似性理论同样是复杂系统仿真的基础	费敏锐 (24)
复杂系统涌现性及其建模仿真的问题	王积鹏 (43)
多自主体复杂网络系统建模仿真的挑战	
——系统控制的观点	汪小帆 (54)
面向复杂系统仿真的模型工程	张 霖 (75)
高效能仿真计算机：复杂系统建模与仿真的技术关键.....	卿杜政 (86)
沙龙总结	李伯虎 (100)
 专家简介	 (104)
部分媒体报道	(117)



会议时间

2011 年 10 月 15 日

会议主题

复杂系统建模仿真中的困惑和思考

会议地点

云南省丽江市云南航空丽江观光酒店

主持人

李伯虎 胡晓峰

李伯虎：

本期沙龙是中国系统仿真学会第三次向中国科协申请并获准承办的重要学术活动。并且,被科协列为 2011 年的示范性学术活动,这是对我们前两期学术活动的肯定。

在座的不少专家都参加过前两期的沙龙,对活动的要求比较了解。为了把沙龙搞好,我们提两点希望:

第一点,希望大家紧扣主题充分交流。这次沙龙的主题是“复杂系统建模仿真中的困惑和思考”,围绕这个主题我们又设置了三个主要研讨议题:

- (1) 复杂系统对传统的建模仿真理论带来哪些本质影响?
- (2) 如何对复杂系统的特性进行建模仿真?
- (3) 复杂系统仿真需要解决哪些关键难题?



这三个议题都是复杂系统建模仿真研究中最具代表性的热点和难点问题,也是我们从各位专家提交的观点摘要中提炼总结出来的。因为交流时间不多,各位专家发言时,一定要紧紧围绕这三个议题,尽量简明扼要,观点明确。总之,在交流中,力争能充分吸纳不同学科、不同专业领域的立场观点,得出一些具有学术价值、可积极推动复杂系统建模仿真研究与应用成果。

第二点,敢于争辩,“科学的本质是批判,交流的本质是质疑”。因此,在沙龙筹备阶段确定邀请专家名单时,我们没有设立资历、学历、专业、年龄、性别等门槛,主要原则:一是从事相关领域研究,不说外行话;二是要敢于发表自己的观点、有自己独到的见解。所以,大家要本着弘扬“敢于质疑、勇于创新、宽容失败”的沙龙精神,大胆表达自己的学术观点和学术灵感。沙龙发言,会后要汇集成册正式出版,希望各位的创新性观点能有力地推动复杂系统建模和仿真技术的研究与应用。



复杂系统建模仿真的困惑和思考

◎ 胡晓峰

按照中国科协召开本期新观点新学说学术沙龙的议程安排,下面,由我先对所要讨论的主要问题作一个说明。虽然名义上是一个引导发言,但也只是一家之言,起一个抛砖引玉的作用,目的是为了能让大家对问题有个了解,方便大家进入情况和讨论,既能聚焦主题,又能畅所欲言。

大家知道,传统仿真方法主要基于还原论思想,建立在牛顿科学体系之下。但随着仿真方法在经济、社会以及战争等领域的广泛应用,复杂系统仿真问题已经摆在了我们的面前。由于复杂系统的性质与传统系统完全不同,如何认识这些性质,如何实现对复杂系统的建模仿真,还存在许多困惑和问题,值得我们认真加以研究和探讨。这就是本次沙龙召开的主要目的。

首先,谈一下对复杂系统以及其特性的认识。

大家知道,我们的世界包含万物,但从系统论的角度来看,它是由很多系统组成的,并且还在不断演化中。这些系统包括宇宙系统、自然系统、生命系统,也包括社会系统、经济系统、交通系统,还包括钟表系统、机器系统、计算机系统等多种多样、大大小小的不同形式。任何系统按结构都可以分为两大种类,即简单系统和复杂系统。

所谓简单系统,就是那些可分解还原的系统,俗称“ $1 + 1 = 2$ ”的系统。简单系统是线性系统,其主要性质包括因果关系明确、结果可重复、结果可预测、状态稳定等。我们常见的机器系统、一般性的物理系统、大多数工程系统等都属于简单系统的范畴,其科学基础主要是牛顿科学体系,认为客观



世界本质上是简单的,就像钟表一样,即使结构再复杂,也可以分解还原。事物按照定律运动,因而可以预测,例如,我们可以精确地计算太阳升落和彗星回归的准确时间。

复杂系统就不是这样,其主要特征就是不可分解还原。根据《科学》1999年4月专刊上的定义,通过对一个系统的分量部分(也就是子系统)性质的了解,不能对系统的性质作出完全的解释,这样的系统就称为“复杂系统”。简单地说就是:系统的整体性质不等于各组分性质之和,也就是“ $1+1 \neq 2$ ”的系统是复杂系统。复杂系统具有非线性,也就是小动因可能带来大后果,且因果关系不明确,结果不可重复、不可预测,系统状态混沌,一定条件下可产生出新的性质,也就是所谓的涌现。

按照成思危的定义,复杂系统中的这些复杂性主要有三大类,即物理复杂性,如天气系统、混沌系统等;生物复杂性,如生命系统、人体系统等;社会复杂性,如经济系统、社会系统等。战争复杂系统是社会复杂性之下很特殊的一类,也是我们长期关注研究的重点。

“复杂性”这个概念是由贝塔朗菲在1928年出版的《生物有机体》一书中首先提出来的。贝塔朗菲是奥地利生物学家,也是“一般系统论”的创始人。后来逐步产生了一个专门研究复杂性的领域,被称为“新科学”,以区别于传统的科学。很多研究单位和学者在这个领域做了很多工作,如圣塔菲研究所,他们特别关注适应性系统、经济与社会等复杂系统及其仿真方法研究,也形成了很多关于复杂系统研究的理论,如普利高津的耗散结构理论、哈肯的协同学、复杂网络动力学理论等。中国对复杂系统研究也作出了很大的贡献,如钱学森等人提出的开放复杂巨系统理论以及综合集成研讨厅方法等。

我认为,复杂系统的复杂性质可以归结为自组织适应性、不确定性和涌现性。一般说来,系统是由众多可以自主适应的系统组分组成的,组分之间存在复杂的相互作用关系,相互作用产生出综合性整体涌现效果,而系统状



态的演变充满了不确定性和偶然性。

首先说适应性。霍兰说过：“适应性造就了复杂性”，并提出了复杂适应性系统(CAS)理论，认为复杂系统是由可以自适应、自学习、自组织、自聚集，并且为适应环境可以使自身结构发生改变的自主个体构成，自主适应性是系统演化的基本动力。

复杂系统的第二个主要性质是不确定性。不确定性是客观世界的真实存在，与人的认识多少无关。这就像海森堡测不准原理一样，与测量精确与否无关。现在对不确定性的争论很多，实际上可以归结为是否承认拉普拉斯的“决定论”，是否承认人的“自由意志”。有些人认为，只要采用了随机数就可以描述不确定性，但随机数的概率分布仍然是“确定的”。

第三个是涌现性。所谓涌现，指的是系统新的整体性质产生。也就是说，每个个体都遵从局部规则，但通过交互，结果会形成整体的效应，也就是“ $1 + 1 > 2$ ”，多出来的就是新的性质。

涌现行为不能通过还原论的输入输出叠加模式得出来。涌现是不确定的，它的产生过程更类似于我们常说的“蝴蝶效应”，是多个层次多个尺度渐进演化的结果，当涌现出现时，让人感觉“意料之外”，而又在“情理之中”。

如何处理复杂性？物理学家伊利亚·普利高津说：“结束现实世界的简单性”，要把“复杂性”当“复杂性”处理，不能简单地进行简化或“降阶”，任何对复杂系统不适当的简化，都会导致其复杂性根源的丧失。对复杂系统的建模与仿真也面临着同样的问题，要找到反映复杂系统特性的仿真方法，才能真正解决问题。

第二，讲一下复杂系统仿真的问题。

复杂系统能仿真吗？似乎已经有了很多成功的例证。比如在经济领域，2002年的诺贝尔经济学奖授予了美国亚利桑那大学的 Vernon L. Smith 教授，他创立了“实验经济学”，采用实验方法研究经济；2004年的则授予了



美国亚利桑那大学的 Prescott 教授与卡内基梅隆大学的 Kydland 教授,他们利用计算实验来研究商业周期问题。这些经济问题的研究都大量采用了仿真的方法。

在军事领域,仿真已经成为破解“战争迷雾”的重要工具,为战法的创新设计提供了重要的支持。例如,海湾战争中,美军对“左勾拳”作战行动的兵棋推演,奥巴马政府制定阿富汗增兵规模的决策问题都用到了建模仿真技术。

在社会学领域,美国 Los Alamos 国家实验室研制了流行病学仿真系统 EPISIMS。这个系统后来被扩展用于应对来自生化领域恐怖袭击的研究。

2011 年 8 月 25 日的 *Nature* 杂志的“cover story”讲述了厄尔尼诺现象与种族冲突之间的联系,发现厄尔尼诺发生的年份发生种族冲突的概率较大,推测可能的原因是气候影响经济 GDP,进而影响社会稳定并导致种族冲突。这里涉及大量的自然与社会协同演化问题,类似这样的典型复杂系统能被仿真吗?在复杂系统建模仿真中还有哪些困惑,这些问题就是需要我们在本次沙龙上要深入讨论的。

问题 1: 复杂性对仿真基础理论的影响

系统仿真是建立在相似性理论基础之上的,这是我们系统仿真学会的创始人之一文传源老先生提出来的。系统仿真的相似性理论基础简单来说,就是通过对实际系统进行建模,使两者之间具有相似性,并且认为如果输入相似,则认为输出也应该相似,从而推论得出实际结果。这样,利用相似性就可以达成仿真的目的,得到实际系统难以得到的结果,例如导弹仿真可以在不真正发射导弹的条件下做到对导弹飞行过程和毁伤效果的模拟计算。

但是,如果仿真的对象是复杂系统,问题会变得比较困难。比如复杂系



统对初值具有很强的敏感性,初始条件的微小不同就会导致复杂系统演化出极大的差异性,有时即使初始条件完全相同,两次不同的仿真过程和结果也会有很大的不同。这就说明,复杂系统很难做到相似,“建模”本身就意味着“失真”,复杂系统模型与真实系统演化会截然不同。那么复杂系统的相似性在哪里呢?

再比如,复杂系统的结果具有不确定性,例如,“胜战不复”、“没有相同的两个经济周期”等,都是我们耳熟能详的例子。连结果都不确定,那么对复杂系统如何进行仿真呢?又如何知道仿真出来的结果是不是就是复杂系统的应有结果呢?或者说,复杂系统模型的结果与真实系统的结果是否存在“相似性”?

仿真的相似性应该体现在何处,值得我们深入研究。传统仿真中对象系统的结构是固定的,相似性模型比较容易建立。而复杂系统的结构是动态的,仿真中又将如何反映这种动态结构呢?换句话说,在复杂系统仿真中,我们应该追求的相似性是什么?是局部的相似,还是整体的相似?是过程的相似,还是结果的相似?是实体的相似,还是行为的相似?复杂系统中,什么是“相似”?“谁”跟“谁”相似?实体、过程、结果相似,还是行为、规律的相似?

在复杂性的影响下,相似性原理在复杂系统仿真中是否还有效?如果有效,应如何理解?如果无效,复杂系统仿真的理论基础又应该是什么?

问题 2:对复杂特性如何进行建模仿真

我们都知道,复杂系统有很多特殊的性质,比如涌现性、不确定性、非线性、自组织适应性等等。对这些特性能够建模仿真吗?这是第二个问题。

“涌现”可建模仿真吗?研究涌现的目的是为了研究系统的新的整体性质,也就是涌现的相变过程,而且涌现特征不能从独立考察组分的行为中



推导和预测出来。从这一点来看,对“涌现”的建模仿真难点就在于如下两个问题:一是描述问题,如何对复杂系统的涌现行为进行描述?如何界定产生涌现的系统组分、类型与规模?如何确定涌现的层次,以及层次之间的关系?如何描述系统组分之间的微观行为与系统宏观行为的对应关系?二是对涌现性建模的认定问题,即如何认定模型产生了新性质或涌现?对涌现出什么都不清楚,又如何知道仿真的就是涌现?

对涌现进行建模仿真已经有了一些实例,比如 boid 鸟群模型,通过基于个体局部交互建模得到整体的涌现效果;美国海军分析中心的 ilachinski 采用人工生命思想建立了基于 MAS 的作战仿真模型;此外还有 ASPEN 系统等。但这些都是正确的方法吗?

亦有人对“涌现性”的建模持悲观态度。例如,兰德公司报告《改进模型和仿真的组合性》提出,“对复杂系统的理解,还是需要通过分解的方法来进行”,认为改进模型的组合性更重要。也有人对利用基于 agent 建模来研究涌现质疑,认为采用 MAS 方法来研究整体涌现是不恰当的,因为 agent 方法片面强调了自下而上的微观过程。

再说复杂系统的另外一个特性,不确定性。对“不确定性”如何进行仿真?大家知道,不确定性分为很多类型,例如随机性、模糊性、灰色不确定性、不确知不确定性等。也还有一类称为“黑天鹅”事件的不确定性,其性质是:发生罕见、影响巨大、不可预测,但事后可解释。

复杂系统的不确定性处理很困难,很难通过概率和模糊等方法来处理。比如过去我们常采用概率的方法,选取某个概率分布函数,按一定概率分布来描述不确定性。后来又有了基于遗传算法的适应性描述方法。但不确定性的建模问题仍然很突出,如概率分布函数的处理方法本质上仍是“确定性的”,而且目前计算机尚不能产生真正的“不确定性”,产生的随机数也都是伪随机数序列等。



如何在不确定条件下得到仿真结果？有些方法做了一些探讨，例如探索性分析方法，对产生不确定的要素进行整体研究；数据耕耘方法，可以探索参数改变引起的整体效果变化等。但通过大样本的多次探索性仿真，模型随机特征会回归其初始分布的“数学期望”。

对于这些，我们应该如何去做？其他的复杂系统特性也有类似的问题。

问题 3：我们需要解决哪些关键技术难题

如何解决可信性、VV&A、仿真实验等问题呢？

首先看模型可信性和 VV&A 问题。在不确定性、涌现性、自组织适应演化等复杂特性存在的情况下，如何判断仿真模型及结果的可信性？如何进行 VV&A？准则又是什么？为解决这些问题，Kheir 等人提出，应尽可能将复杂的系统分成多个子系统，通过对各个子系统的评估来对复杂系统模型整体的可信性问题进行分析。也有人提出采用图灵法，即由熟悉真实系统的专家对仿真输出进行评估。但这些方法能够解决可信性等问题吗？

再看仿真实验问题。用计算机能够完成复杂系统仿真实验吗？复杂系统模型实验与简单系统是一样的吗？统计分析是否仍然合适？误差分析是否仍然合理？大规模并行计算能够解决复杂系统仿真问题吗？并行计算能够解决哪些复杂系统仿真问题？选取多大粒度进行仿真更为合适？时空尺度边界在哪里？综合集成研讨厅可以完成人机结合的仿真实验吗？如何实现人机的结合？从定性到定量如何实现？这些都需要我们认真加以探讨。

在信息技术、复杂网络、人工智能等科学技术的支撑下，仿真建模理论与方法已经得到了很大的发展，在社会管理、国防安全、复杂装备制造、生命科学等领域发挥着重要作用，也唤起了人们深入探索复杂系统演化及涌现规律的兴趣和愿望。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，明确提出要利用先进信息技术研究复杂系统仿真问



题,以辅助解决社会复杂问题,并率先提出了“基于仿真的科学与工程”的概念。再比如欧洲的 ONCE - CS 研究组织,即复杂系统卓越中心开放网络 (Open Network of Centres of Excellence in Complex Systems),提出了复杂系统仿真相关的一些核心问题:复杂系统的模型重构、涌现特征的定义与仿真、复杂系统的瞬态突变、层次以及时空尺度问题、如何研究复杂系统等等。

当前复杂系统仿真已经成为研究复杂系统的基本途径,基于仿真的社会计算、经济计算、战争计算成为了新的热点研究领域。美国 16 名科学家提出要建立“计算社会科学”学科,其主要技术基础也是复杂系统仿真。我们本次沙龙就是要围绕复杂系统建模仿真中理论和实践问题展开深入探讨。

最后说一下沙龙讨论的安排。

我们下面的讨论将分为三个单元:

第一单元:复杂系统对仿真基础理论的影响,相似性理论仍然适用吗?还会有哪些性质发生变化?

第二单元:复杂系统特性的建模仿真问题,涌现性、不确定性、自组织适应性等可以仿真吗?

第三单元: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解决?

最后,进行会议小结。



仿真是还原论与整体论建模的桥梁

◎肖田元

我们学会已经承办了三次沙龙,第一、第二次都是由我来当“靶子”,都是讲不成熟的观点。刚才胡教授关于复杂性系统的问题,给我们做了一个详细的介绍。这次沙龙要讨论的问题,我理解的核心是“复杂性系统能仿真吗?”这个问题。

对这个问题的回答首先是如何认识复杂性系统。我的看法是:系统的复杂性包括不确定性、适应性、涌现性等。我的理解是: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,而涌现性是系统性质发生相变产生的新性质。

仿真是基于模型的,核心的问题是如何使模型具有复杂性系统的本质特征,因为模型不可能是跟实际的系统完全相同,如果相同就不叫模型,所以这是它的本质特征,这就引发了所谓“能否建模”继而隐喻“能否仿真”的问题。

我认为,仿真是逐步认识系统复杂性的重要科学手段,基于演化的复杂系统的建模与仿真方法学亟待发展。

能否仿真首先是能否建模。大家都知道,建模基本上有两种方法,一个是基于还原论、一个是基于整体论。

还原论: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。核心