

中国工程科技论坛

# 信息时代仿真与建模

---

● 中国工程院

高等教育出版社

中国工程科技论坛

# 信息时代仿真与建模

Xinxi Shidai Fangzhen Yu Jianmo



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, 在各类应用需求的牵引及有关学科技术的推动下, 仿真科学与工程已经发展成为一项通用性、战略性技术, 并正向“数字化、高效化、网络化、智能化、服务化、普适化”为特征的现代化方向发展, 其应用正向服务于各类系统的全寿命周期活动的方向发展。本书以“信息时代仿真与建模技术”为主题, 邀请航空、航天、航海、国民经济、国防等领域内从事仿真、控制技术研究与应用的院士、专家就仿真工程与科学在信息时代我国实施“两化融合”发展战略中的作用与地位进行深入研讨, 从国民经济与国家安全的角度提出我国仿真工程与科学的发展思路, 探讨我国仿真科学与工程的发展战略、关键技术与主要对策, 展望我国仿真工程与科学可能取得的重大进展。

本书适合相关领域的研究者、技术人员、学生阅读。

## 图书在版编目(CIP)数据

信息时代仿真与建模 / 中国工程院编著. -- 北京 : 高等教育出版社, 2015.9  
(中国工程科技论坛)  
ISBN 978-7-04-043774-4

I. ①信… II. ①中… III. ①仿真-研究②建立模型-研究 IV. ①N032②022

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 213078 号

### 总策划 樊代明

策划编辑 王国祥 黄慧靖 责任编辑 黄慧靖 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	网 址	<a href="http://www.hep.edu.cn">http://www.hep.edu.cn</a>
社 址	北京市西城区德外大街 4 号		<a href="http://www.hep.com.cn">http://www.hep.com.cn</a>
邮政编码	100120	网上订购	<a href="http://www.landaco.com">http://www.landaco.com</a>
印 刷	北京汇林印务有限公司		<a href="http://www.landaco.com.cn">http://www.landaco.com.cn</a>
开 本	787 mm × 1092 mm 1/16	版 次	2015 年 9 月第 1 版
印 张	7	印 次	2015 年 9 月第 1 次印刷
字 数	130 千字	定 价	60.00 元
购书热线	010-58581118		
咨询电话	400-810-0598		

---

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 43774-00

## 编辑委员会

主 任：李伯虎

副 主 任：段宝岩 李德毅 马远良 吴 澄 赵沁平

委 员(按拼音字母排序)：

范文慧 胡晓峰 康凤举 刘兴堂 王精业

吴云洁 肖田元 姚益平 张 霖

编辑人员：刘诗璇 赵 罡

## 郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人将承担相应的民事责任和行政责任；构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人进行严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话 (010) 58581897 58582371 58581879

反盗版举报传真 (010) 82086060

反盗版举报邮箱 dd@hep.com.cn

通信地址 北京市西城区德外大街4号 高等教育出版社法务部

邮政编码 100120

# 目 录

## 第一部分 综述

综述 .....	3
----------	---

## 第二部分 主题报告及报告人简介

中国仿真产业发展战略 .....	范文慧 等	11
兵棋推演与复杂系统管理——仿真工程的应用创新与实践 .....	胡晓峰	22
航海仿真方法新探 .....	康凤举 等	33
复杂仿真系统 VV&A 活动与可信度评估综述 .....	刘兴堂 等	54
作战仿真系统的复杂性探讨 .....	王精业	66
基于联邦架构的云仿真 .....	肖田元	71
流焰光现象的数据获取与重用 .....	赵沁平等	84
附录 主要参会人员名单 .....		101
后记 .....		103

# 第一部分

## 综 述





# 综 述

## 一、论坛背景

计算机仿真已经成为继理论和实验/观察这两个传统科学研究范式之后的第三范式,从而为人类认识世界和改造世界提供了全新的方法和手段。美国全球技术评估中心(World Technology Evaluation Center, WTEC)在其2009年发表的报告中指出,“计算机仿真已经成为当今推进科学研究和工程实践的基础设施的关键部分。”“今天的仿真工程与科学的‘预测’能力是对理论和实验/观察这两个传统的科学研究支柱强有力的补充;今天的计算机仿真技术已经比人类历史上的任何时期都更为普及,而且影响力更大。在许多关键技术的研发过程中,甚至达到了如果脱离了仿真则几乎无法被理解、开发和应用的地步。”

近年来,在各类应用需求的牵引及有关学科技术的推动下,仿真科学与工程已经发展成为一项通用性、战略性技术,并正向“数字化、高效化、网络化、智能化、服务化、普适化”为特征的现代化方向发展,其应用正向服务于各类系统的全寿命周期活动的方向发展。近几十年来,特别是在改革开放的大好形势下,我国的仿真科学与技术也得到了飞速的发展,并已成功应用于航空航天、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、生活服务等国民经济、国防建设、自然科学、社会科学、民生领域的系统论证、试验、分析、维护、运行、辅助决策及人员训练、教育和娱乐等。

我国人口众多、资源短缺、环境恶化,国家周边安全面临挑战,必须在科学发展观指导下,走“科技含量高、经济效益好、资源消耗低、环境污染少、人力资源优势得到充分发挥的新型工业化道路”和“科技强军”道路,仿真科学与工程是实施这种发展战略、实现我国可持续发展的必不可少的重要科学技术手段。我国仿真科学与工程将迎来新的发展战略机遇和挑战,在此背景下,中国工程院组织国内相关领域的专家,举办“信息时代仿真与建模技术”论坛,基于信息时代建模仿真领域的研究成果,针对遇到的困难与挑战,通过国内外高水平专家、学者的交流活动,分析我国在大数据时代下实施的“两化融合”发展战略对仿真科学与工程的需求,探讨我国仿真科学与工程的发展战略、关键技术与应用,以推动仿真理论技术研究和仿真应用研究的共同发展。

## 二、论坛整体情况

2014年10月12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西北工业大学联合承办的“第193场中国工程科技论坛——信息时代仿真与建模技术”在西北工业大学国际会议中心举办。

会议邀请中国工程院副院长陈左宁院士、中国系统仿真学会现任理事长赵沁平院士、西北工业大学副校长魏炳波院士分别致辞,中国系统仿真学会前任理事长李伯虎院士主持开幕式及会议,来自中国工程院的6位院士及各高校、科研院所、企事业单位的300余位国内仿真领域的专家和科技工作者参加了会议。

会上,8位学者为大家呈现了精彩的报告。中国工程院院士、清华大学吴澄院士作了“城市承载力及运行优化决策的建模与场景仿真”的大会报告;中国工程院院士、欧亚科学院院士、中国人民解放军总参谋部信息化部李德毅院士作了“大数据时代的跨界创新”的大会报告;中国工程院院士、西北工业大学马远良院士作了“水下观测的挑战——‘动态海洋声学’的理论框架”的大会报告;中国工程院院士、西北工业大学段宝岩院士作了“大型天线分析与设计的仿真研究”的大会报告;中国工程院院士、航天科工集团公司二院科技委李伯虎院士作了“复杂系统高性能建模与仿真技术研究”的大会报告;国防大学胡晓峰教授作了“兵棋推演与复杂系统管理”的大会报告;清华大学范文慧教授作了“中国仿真产业发展战略”的大会报告;国防科技大学姚益平教授作了“面向军事分析仿真的三级并行技术及其挑战”的大会报告。

本次论坛邀请仿真、控制、航空、航天、航海、国防等领域的院士、专家就仿真工程与科学在大数据时代我国实施“两化融合”发展战略中的作用与地位进行深入研讨,从国民经济与国家安全的角度提出我国仿真工程与科学的发展思路,明确需要解决的重大关键技术,展望我国仿真工程与科学可能取得的重大进展。论坛围绕信息时代仿真与建模的挑战与对策以及相关建模仿真理论与技术展开研讨,重点包括仿真工程与科学将如何支撑以工业互联网为标志的工业技术革命;面对大数据,作为人类认识世界的第三种方法应如何进一步发展;仿真工程与科学如何为我国标志性工程的自主开发、安全运行、维护、服务等提供技术支撑和保障等方面的国际前沿问题。各位参会专家对信息时代仿真与建模的发展各抒己见,踊跃发言,提出了具有前瞻性的新观点、新策略,论坛最终取得了圆满的成果。

### 三、专家发言内容摘要

#### (一) 城市承载力及运行优化决策的建模与场景仿真

城市发展的顶层规划是重大且复杂的问题。一个城市发展到多大规模为好?涉及经济(GDP、财政收入、就业、CPI、融资及资金投向……)、生态(环境、污染治理……)、民生(医疗设施、交通、教育、文化设施、社会安全……)等众多方面,用比较科学的、定量的方法为城市发展的决策者提供科学手段,辅助决策,提高执政能力,是十分有意义的。

城市承载力及运行优化决策问题的难点是建立各种指标和约束与决策之间的关系,即各种指标预测模型和约束模型。由于数据类型多(区间型、符号型……)、数据短缺、决策影响指标(或约束)的不确定滞后等,这是一个挑战性的问题。在错综复杂的问题中优化问题的形式化描述以及求解中的强非线性、复杂约束(几十个)也是难点。而智能建模与优化、仿真技术和场景分析是一个有效方法。

报告以我国一个特大城市(人口近千万)的数据为背景,研究城市发展的承载力问题和运行优化决策问题,讨论了GDP增长率的智能预测模型,进行了城市承载能力综合分析与资源优化配置模型及场景仿真分析和城市发展的优化决策模型及场景仿真分析。

#### (二) 大数据时代的跨界创新

泛在传感器、移动互联网和云计算造就大数据时代,学科交叉加速,产业前沿延伸,新兴商业涌现,传统意义的学科界别、产业界别、商业界别日趋模糊,包括机器人在内的许多“四不像”技术和产品,“四不像”学科、产业和商业,也许成为创新的主要形态,正是它们造就了现代社会的时代特征!跨界创新难在哪里?报告以无人驾驶技术为例,分析汽车制造与IT技术相互渗透、碰撞、倒逼而形成颠覆技术的过程、现状和难点,探索了驾驶行为形式化、人机和谐交互的方法,并进一步展望智能机器人产业的跨界创新和发展;提出机器人革命的到来,或许是我们抓住历史机遇的一场盛宴。

#### (三) 水下观测的挑战——“动态海洋声学”的理论框架

水下空间被称为人类活动的第四空间,水下观察与通信依靠的是声波而不是电磁波,由于其特殊的困难,信息网络的建设常常止于海面。为使海洋成为“声学透明”,需大力发展海洋声学,研究海洋中声波的产生、传播、目标特性、环

境噪声、水体温度 - 盐度 - 深度变化的影响、海面与海底界面特性的影响等。可是其中许多因素具有空时四维变化,与海洋环流的动力学过程有关,也与海面气象的变化和气 - 液热交换有关。因此,未来水下观测的根本出路在于:建立动态“海洋声学”。孤立的声学研究难以解决问题,有必要将卫星海面遥感、海面气象水文观测、水声环境调查数据库、海洋动力学建模、海洋声场建模以及先进数据同化理论与技术等纳入统一的系统框架。

#### (四) 大型天线分析与设计的仿真研究

针对大型天线设计中存在的复杂多场耦合问题,报告通过研究大型天线结构位移场 - 电磁场 - 温度场之间相互影响、相互作用的关系,探明结构因素对天线性能(电、磁、热等)的影响机理,建立相应的数学描述,进而得到机、电、热多场非线性耦合理论模型,实现了大型天线综合性能的精确分析。在此基础上,讨论了多学科优化模型的建立及其求解策略,形成了大型天线的机电耦合设计方法。通过典型工程案例(40 m、66 m 大型反射面天线,500 m FAST 及 16 m 空间可展开天线等)进行验证,获得了良好的效果。在上述理论研究中,逐步完善了针对大型天线仿真分析的一套科学方法并建立了综合设计平台,对工程应用起到了一定的指导作用。最后,总结了大型天线仿真与设计未来的发展趋势及方向。

#### (五) 复杂系统高性能建模与仿真技术研究

报告概述了作者所在团队近期在复杂系统高性能建模与仿真技术研究方面的研究成果。首先讨论了复杂系统及复杂系统高性能建模仿真技术的内涵和复杂系统建模仿真的技术需求、技术体系及其发展趋势。进而在复杂系统仿真建模方法方面,概述了定性与定量混合系统建模方法、基于元模型框架的建模方法、变结构系统建模方法和三级并行高效能建模方法等研究成果。在复杂系统仿真支撑平台技术方面,概述了高性能仿真云、多学科虚拟样机工程、复杂系统仿真语言、高性能仿真计算机、高性能可视化技术等研究成果。在复杂系统仿真应用工程技术方面,概述了复杂系统建模与仿真 VV&A 技术、仿真结果管理、分析与评估技术等研究成果。接着简要介绍了几个高性能仿真计算机上的应用案例。最后提出了值得关注的研究工作,包括大数据时代的仿真技术、普适仿真技术、嵌入式仿真技术、赛博空间仿真技术等。

#### (六) 兵棋推演与复杂系统管理

当今世界,面临着不对称冲突、安全与战争威胁、激烈的全球竞争和动荡的

经济环境,对这些问题的有效应对已经成为各个国家必须面对的难题。但社会系统、危机系统以及战争系统都是典型的复杂系统,具有组成复杂、活动复杂和效果复杂等特点,很难用分解还原、静态线性等传统方法进行研究和管理。兵棋推演,作为一种面向复杂系统整体、以动态对抗推演为主要形式的仿真活动,为管理复杂系统、解决棘手问题提供了一种有效的方法,成为世界发达国家辅助决策的重要手段。

报告从美国举行的“空海一体战”、“石油风暴”和“网络冲击波”等几场重要的兵棋推演开始,探讨了复杂系统管理面临的挑战和难题,讨论了兵棋推演用于复杂系统管理的基本方法,介绍了我国大型兵棋工程在仿真平台研发、推演组织模式,以及兵棋工程建设等方面的创新及实践,并对未来的主要发展趋势进行了深入的探讨。

### (七) 中国仿真产业发展战略

报告介绍了仿真科学技术的内涵、重要性、发展方向、发展重点,及其在制造业、军事领域、电力行业、农业、机械行业、数字娱乐行业和医疗等行业的典型应用;将仿真产业分为仿真产品、仿真工程及仿真服务三大类,对仿真产业市场规模及需求作了较全面的分析,对仿真产业竞争格局和中国仿真产业发展进行了预测分析;提出了中国仿真产业发展应把握的发展规律和采取的十六字方针,以逐步形成能够满足社会经济发展需要的“世界先进、自主安全、军民融合”的仿真产业能力;报告从自主创新目标、应用推广目标、产业规模目标及综合保障目标四个方面提出了 2030 年前中国仿真产业发展目标;提出了中国仿真产业发展的三大战略重点,以及六方面发展措施与建议。

### (八) 面向军事分析仿真的三级并行技术及其挑战

分析仿真是研究和分析复杂系统的有效途径。作为与实验研究及理论研究对等的方法论,分析仿真在国防和国民经济领域正得到越来越广泛的应用。随着分析仿真应用的不断发展,仿真规模正在逐步扩大,仿真模型越来越复杂,其对计算资源的需求也越来越多,使得提高计算效率、减少仿真时间正成为当前分析仿真的一个紧迫任务。并行处理是解决该问题的有效途径。报告介绍了复杂系统分析仿真所具有的计算特点——大样本、多实体、超实时、复杂模型解算、因果序协同;基于这些特点提出了分析仿真三级并行的解决方案——多样本并行、多实体并行、复杂模型解算并行。其中,多样本并行由于样本之间没有运行依赖关系而相对比较容易实现;实体级并行也即 MPI 任务级并行,是并行仿真需要研究解决的核心所在;复杂模型解算的并行目前有多种实现途径——多核 CPU、

MIC、GPU、FPGA、DSP等。报告对三级并行技术及其所面临的挑战进行了全面的介绍,并对今后进一步的研究进行了展望。

#### 四、结语

仿真工程与科学,是提升自主创新能力不可或缺的支撑技术。在我国“两化融合”战略的深入发展、“人、机、物”三元融合形成的大数据时代即将到来的形势下,仿真工程与科学面临着巨大的挑战。我们必须未雨绸缪,抓住机遇,探索在这一形势下我国仿真工程与科学的发展思路,力争打破西方工业发达国家长期垄断的局面,以便为我国的国民经济持续发展、保障国家安全提供有力的技术手段。

信息时代仿真与建模面对的是复杂系统,必须考虑复杂系统的自适应性、涌现性、不确定性、预决性、演化性、开放性和博弈性等特点。在本次论坛中,与会专家学者就信息时代仿真与建模进行了深入的探讨,对信息时代仿真与建模研究提出了许多有益建议,提出了具有前瞻性的新思路、新观点、新策略,达到了从顶层、宏观水平思考及分析的目的,推动了信息时代仿真与建模理论研究的共同发展,势必会为我国的国民经济建设、国防建设、科学与社会发展做出新的更大的贡献。

## 第二部分

### 主题报告及报告人简介





# 中国仿真产业发展战略

范文慧 等\*

清华大学

## 一、仿真科学技术的内涵、发展方向和重点

仿真科学与技术是以建模与仿真实论为基础,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的一门综合性、交叉性学科与技术。

仿真科学与技术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学科。经过近一个世纪的发展历程,学科知识体系日趋完善,并具有学科的相对独立性,学术共同体已经形成,在国家科学技术发展、产业发展和社会进步中的战略重要性日益突出。

仿真技术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理活动难以到达的宏观或微观世界去进行研究和探索,从而为人类认识世界和改造世界提供了全新的方法和手段。2005年6月,美国总统信息技术顾问委员会在给总统的建议报告“Computational Science: Ensuring America's Competitiveness”中指出,由建模仿真算法与软件、计算机与信息科学以及计算基础设施三大元素构成的计算科学,已经逐步成为继理论研究和实验研究之后认识、改造客观世界的第三种重要手段。

仿真技术在我国国民经济、国防建设、自然科学、社会科学等领域正发挥着越来越大的作用,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、生活服务等众多领域的系统论证、试验、分析、维护、运行、辅助决策及人员训练、教育和娱乐等方面。

仿真技术已经成为一项通用性、战略性技术,并正向“数字化、高效化、网络

\*作者:中国工程院赵沁平院士、李伯虎院士,清华大学肖田元教授、范文慧教授,中国航天科工集团二院科技委总工程师李国雄,哈尔滨工业大学马萍教授,国防科技大学邱晓刚教授,中国电子科技集团公司电子科学研究院集团首席科学家王积鹏,北京航空航天大学吴云洁教授、张霖教授。