

中国自动化学会系统仿真专业委员会
中国系统仿真学会仿真计算机与软件专业委员会

2004 学术论文集 (第六卷)

系统仿真技术及其应用

System Simulation Technology & Application

(Vol. 6)

陈宗海 主编

中国科学技术大学出版社

中国自动化学会系统仿真专业委员会
中国系统仿真学会仿真计算机与软件专业委员会

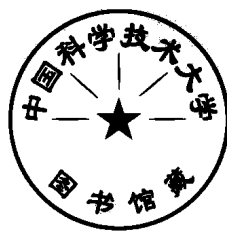
2004 学术论文集（第六卷）

系统仿真技术及其应用

System Simulation Technology & Application

(Vol. 6)

陈宗海 主编



中国科学技术大学出版社

2004 · 合肥

内 容 简 介

本书为中国自动化学会系统仿真专业委员会和中国系统仿真学会仿真计算机与软件专业委员会于 2004 年 8 月联合组织的'2004 系统仿真技术及其应用学术交流会的论文选编。

书中收录了会议录用论文 130 篇,是近年来系统仿真技术在航空、航天、石油、化工、能源、国防、轻工等领域中应用的最新成果,以及建模与仿真方法的最新进展。

本书可供科研、设计部门和厂矿企业中系统仿真技术研究和应用人员以及高等学校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

系统仿真技术及其应用/陈宗海主编.—合肥:中国科学技术大学出版社,2004.8
ISBN 7-312-01713-4

I. 系… II. 陈… III. 系统仿真—学术会议—文集 IV. TP391.9-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 074517 号

中国科学技术大学出版社出版发行

(安徽省合肥市金寨路 96 号,230026)

中国科学技术大学印刷厂印刷

全国新华书店经销

开本:787×1092/16 印张:49 字数:1220 千

2004 年 8 月第 1 版 2004 年 8 月第 1 次印刷

ISBN 7-312-01713-4/TP·343 定价:200.00 元

《系统仿真技术及其应用》编委会

主 编：陈宗海

副主编：王正中 肖田元

编 委：王正中 李伯虎

肖田元 吴连伟

沈 廉 陈宗海

奚宏生 屠仁寿

和全球超过 **10,000** 个用户一起使用最畅销的系统仿真软件, 体验高效率和随心所欲的建模感受, 您不能错过对 **EXTEND** 软件的了解。详情请见 www.edgestone-it.com

EXTEND™ 高效率系统动态仿真软件

EXTEND 简介

EXTEND 系统仿真软件是由美国 Imagine That 公司开发的优秀仿真平台。1988 年推出之后, 在仿真领域产生开拓性深远影响, 成为第一个功能强大、低价位、主要基于 Windows 操作平台的软件, 创造了如下几个行业第一:

- ◆ 多层次模型结构, 可以使复杂的模型层层简化;
- ◆ 开放源代码的建模和集成开发环境, 可扩展性无可比拟;
- ◆ 基于模块间消息传递的体系结构;
- ◆ 多家第三方公司联合打造模块库, 使得这个仿真平台一开始就成为开放式仿真平台的标准。

EXTEND 突出特点

- EXTEND 仿真软件轻巧、直观、经济, 并且功能强大, 学习曲线非常短, 建模效率非常高, 尤其适合教学、科研和咨询领域;
- 为数不多的可以仿真连续 (Continuous)、离散 (Discrete) 和流体行业 (Flow) 的多用途、多功能、低价位、高效率的仿真平台;
- 公开的体系结构、公开的源代码和自带的集成开发环境 (Integrated Development Environment) 可以提供其他仿真软件不可比拟的可扩展能力。甚至可以重写所有的模块、动画、逻辑, 只要会 C 语言, 就可以轻松开发自己的仿真项目。将你的算法和模块代码完美结合, 得到的就是比购买 EXTEND 软件更有价值的解决方案;
- 内嵌 600 多个系统函数可以实现和数据库、EXCEL 和其他数据源的集成, 充分利用 WINDOWS 操作系统的资源, 可以和 Delphi、C++ Builder、Visual Basic、Visual C++ 代码链接;
- 基于模块库的建模方式, 提供超过 200 个预制模块, 采用直观形象的拖拉交互式建模界面, 实现动画仿真功能;
- 采用多层次建模体系 (Hierarchical Modeling), 可以使复杂的模型无限制层层分解, 使模型条理清晰, 逻辑严谨;
- 强大的统计功能和图形输出功能。不用编程, 仅靠拖拉方式, 就可以很快的建立各种图表显示。可以和众多统计拟合器相结合 (例如 Best Fit、Expert Fit、JMP 和 Stat Fit), 快速建立最佳拟合和曲线。

EXTEND 软件价格

- 学校单机版 从 6000 元人民币到 2.5 万人民币, 具有和商业版完全相同的功能, 没有模块限制;
- 仿真实验室局域网络版, 每个用户 1500 元人民币, 只需三万元人民币可以实现 20 个并发用户, 功能和商业版相同。
- 详情请见 www.edgestone-it.com

EXTEND 已经应用的领域

EXTEND 在以下领域都有广泛应用，部分案例见www.edgestone-it.com

横向领域				
生产线负载平衡	路径规划	优化算法 ✓	作业成本法	流程改善
设备分配	并购决策	调度	绩效管理	库存管理
瓶颈分析	生产线管理	人员安排	新技术引进	项目管理
产能规划	排队论	需求管理	批量管理	制造周期研究
风险管理	workflow 管理			
纵向领域				
政府流程	树木培植	服务行业	工厂设计和布局	生理学
信息科技	供应链管理	软件工程	安全系统 ✓	化工领域
业务建模	食品行业	航空/机场	半导体制造	物流
呼叫中心	教育培训	精神病学	包装应用	水煤电市政管理
生产制造	认知建模	医药行业	通讯系统	废物处理
运营管理	酿酒行业	包裹运送		

EXTEND 部分学校用户名单

EXTEND 的用户全球有超过 10,000 家，包括大部分世界财富 500 强企业和世界知名研究机构，部分知名学校、科研机构和咨询公司客户如下：

- 哈佛商学院，斯坦福大学，耶鲁大学，美国宇航局，东京大学，普渡大学，佐治亚理工，伊利诺斯大学，依阿华大学，马里兰大学，麻州大学，墨尔本大学，宾州大学，德州大学，威斯康星大学，埃森哲，麦肯锡，普华永道，毕博等等。

EXTEND 部分用户反馈（以实际案例为依据）

半导体公司利用 EXTEND 对整个复杂制造流程和配方进行优选，可以为生产商节约大概 32% 的时间（利用人工及其它辅助工具进行优选的时间）；大型消费品制造公司利用此软件对产品制造的可靠性进行模拟，使公司及时引进高新技术，为公司直接节约 1 亿美元；石油公司用 EXTEND 软件来论证其一个总投资 5.7 亿美元的项目；在公共卫生系统也可以利用 EXTEND 软件对医疗机构建设和医疗突发事件进行模拟，这在美国主要的城市得到普及；国际饮料代理商也是该软件的受益者，他们可以对世界各地饮料的需求量和饮料价位进行估算；物流公司可以应用其模拟结果与实际物流耗费时间比较来优化传送系统；在美国一些法律部门也利用此仿真软件来模拟对疑犯拘捕和询问，从而找到最合适的审判程序；作为信息传输的呼叫中心通过模拟完全可以达到既省钱又可及时对其客户请求做出响应；美国能源部在重新制定石油储运时也应用 EXTEND 软件进行仿真模拟，既缩短了装载时间、改善了储存和分配，信息的传递也大大降低了费用。

联系方式：详细资料请见 www.edgestone-it.com，发 email 到 info@edgestone-it.com 索要免费光盘、资料和教学案例。刃之砺信息科技（上海）有限公司感谢您对 EXTEND 的兴趣。

写在卷首

随着新世纪的到来，近代计算机技术、通信技术等高科技的发展，伴随的信息产业革命已经初现端倪。信息时代的曙光，使“仿真”这个古老而又年轻的学科更加朝气蓬勃地播散着无限青春的活力。

信息社会化的进程，迫使系统仿真技术面对丰富多彩的客观世界。信息化和信息社会化，使人类处理的系统规模与复杂性日益增长，人类对系统的认识和研究逐步深化，可利用的信息资源的影响已具有全球的性质。这个信息社会化和高科技迅猛发展的背景，推动了系统仿真方法学的革新、发展与进步。

近年来，建模与仿真方法学致力于更自然地抽取事物的特征、属性和实现其更直观的映射描述，寻求使模型研究者更自然地参与仿真活动的方法。现阶段依托包括网络、多媒体等在内的计算机技术、通信技术等科技手段，通过友好的人机界面构造完整的计算机仿真系统，提供强有力的、具有丰富功能的软硬件营造的仿真环境，使开放复杂巨系统的模型研究，从单纯处理数学符号映射的计算机辅助仿真（CAS），强化包括研究主体（人）在内的具有多维信息空间的映射与处理能力，逐步创建人、信息、计算机融合的智能化、集成化、协调化高度一体的仿真环境。可见，信息时代的来临正在孕育着系统仿真方法学某些新的突破。正待开发的系统仿真方法和仿真技术广阔无垠，需要我们从事系统仿真的技术工作者付出艰辛的劳动，使仿真这门迄今为止最有效的经济的综合方法和推动技术进步的战略技术在现代化进程中发挥更大的促进作用。

由中国科学技术大学自动化系、中国自动化学会系统仿真专业委员会、中国系统仿真学会仿真计算机与软件专业委员会主办的‘2004 系统仿真技术及其应

学术会议，共收到论文 165 篇，录用 130 篇。其中，大会报告 6 篇；建模与仿真技术 37 篇；系统仿真 33 篇；航天与装备仿真 26 篇；控制决策及其它 28 篇。收录的论文涉及广泛的领域，内容丰富多彩。这次学术交流，无疑将对我国系统仿真学科和仿真技术的发展起到有效的促进作用。

编 委 会

2004 年 7 月于中国科学技术大学

目 录

一、大会报告

1. 定性定量仿真技术的研究.....陈宗海 黄元亮(001)
2. 迎接网络化时代战争的挑战, 建立中国信息化战争模拟体系——
兼论复杂战争模拟/仿真实论、方法与应用.....金伟新 肖田元 (011)
3. 系统仿真技术展望.....姜一辉 张启信 (021)
4. 复杂系统基于 Agent 的建模与仿真设计模式.....廖守亿 戴金海 (025)
5. 量子控制系统模型的比较研究.....董道毅 陈宗海 陈春林 (029)
6. 基于 HLA 的三维视景仿真系统设计与实现.....
.....贾连兴 汪 霖 宣国民 邢小平 朱英浩 (035)

二、建模与仿真技术

7. 仿真与 Bayes 方法鉴定远程多管火箭炮射击精度.....张 俊 郭娜娜 廖晓斌 (041)
8. 蒙特卡洛法计算炮兵营射击效率的数学模型.....赵太平 刑立新 高善清 (047)
9. HLA 时间管理的实时性扩展.....徐大勇 蒋晓原 王 钰 (052)
10. 水下三维空间声线管束轨迹可视化.....南明星 (058)
11. 城市河流水环境可视化建模及仿真研究.....郭莲英 景韶光 王东木 (064)
12. 基于仿真的指挥自动化系统对抗效能评估研究.....张义宏 张连庆 (070)
13. 分层式强化学习的定性空间表达.....陈春林 陈宗海 卓 睿 (075)
14. 野战通信网业务量预测分析与建模.....
.....王应泉 贾连兴 詹志刚 宣国民 (085)
15. 异步电动机 PWM 变频调速系统的建模与仿真.....夏 玲 (091)
16. 基于增强型参考位置的粒子群优化模型.....徐俊杰 忻展红 (096)
17. 三维结构背景仿真参数纠正方法研究.....孙向军 刘凯龙 王世鑫 (101)
18. 结合 TD(0) 的马尔可夫链扰动分析求解算法.....徐义春 韩 芳 (106)
19. 到达时间差定位技术的仿真研究.....张 波 石昭祥 (112)
20. 基于测度变权的装备运用水平评价模型.....马维斌 陈东林 付 姚 (118)
21. 材料设计系统可视化模拟.....袁斯华 包生祥 (125)
22. 直流调速系统的 SIMULINK 仿真.....吴 云 (131)
23. 基于 DCOSE 的热力系统图形化建模方法.....刘树清 睦 喆 余圣方 (136)
24. 基于 LQG/LTR 方法的结构振动 AMD 控制 Benchmark 模型仿真分析
.....杜永峰 曹志峰 孙玉萍 (143)

25. 某型地地战役战术导弹部队突击反导防空导弹阵地火力计划模型研究
.....斗计华 张启信 姜一辉 (148)
26. 洪水预报和防汛调度系统中的仿真技术应用.....赵 颖 刘裕辉 王万东 (154)
27. 基于 ArcGIS 的城市道路仿真模型构建.....刘 旭 胡 刚 钟晓珊 (166)
28. 基于 IBR 的虚拟驾驶视景生成技术.....叶 磊 李 焱 (174)
29. 基于 FPGA 的位移序列多进制扩频系统的仿真研究.....赵洪林 杨哲理 王 钢 (179)
30. 航海动态仿真系统中分块匹配视频图像的帧间压缩算法.....刘 丹 Sean He (184)
31. 基于 BOM 进行快速仿真开发的关键技术研究.....李 渊 何 明 (189)
32. 基于 XMSF 组播的拥塞控制模型的研究与实现.....
.....罗 晨 何 明 黄 松 刘晓明 (194)
33. 基于线划图和数码影像构建城市街道模型.....朱英浩 (200)
34. 一种基于组见的多分辨率建模方法.....刘小荷 朱汉东 赵 虹 (205)
35. Observer 设计模式的改进型模式的实现与研究.....
.....于爱荣 王 俊 刘晓明 曹 雷 (211)
36. 减少倒立摆 T-S 模糊控制系统前提变量的仿真探讨.....高丽丽 石辛民 (218)
37. 基于可扩展建模与仿真框架(XMSF)的可组合性研究.....夏丽丽 曹 雷 何 明 (222)
38. 基于图论算法的蛋白质结构的同源建模.....史晓红 刘文斌 (228)
39. 一种机动目标跟踪的交互式多模型算法.....
.....巴宏欣 赵宗贵 刘海燕 杨 飞 曹 雷 (234)
40. 晶体生长实验流场数据的可视化研究.....吴晓莉 史美萍 (239)
41. 基于红外仿真的动态场景投射方式优化研究.....赵世明 王忠巍 (244)
42. 超高速撞击数值算法应用对比研究.....乐 莉 闫 军 (250)
43. 基于二维熵的主动区域模型.....方 伟 陈会勇 陈宗海 (255)

三、系统仿真

44. GNSS 卫星仿真器的一种设计方案.....扈光锋 王艳东 范跃祖 (263)
45. 分布式卫星编队仿真系统.....李新洪 曾国强 王兆魁 (269)
46. 基于 Vxworks 的惯性导航系统中人机交互界面的设计.....陈 洁 汪顺亭 (274)
47. 仿真数据库系统开发.....陈 刚 高 翔 许继恒 (281)
48. 单牙轮钻头与岩石互作用计算机仿真.....吴泽兵 廖忠民 (285)
49. 基于雷达观测的空间目标识别仿真系统设计.....蒋立正 李宗利 刘淑茜 (290)
50. 振动试验仿真系统中的数据通讯实现.....宋 琼 牛宝良 严 侠 (296)
51. 基于 C MEX S-函数开关磁阻电机控制系统仿真建模研究.....薛 花 纪志成 (302)
52. 45000DWT 成品油船货油装卸系统仿真.....杨 立 林 焰 陈 明 (311)
53. 利用高层体系结构(HLA)开发单武器训练仿真系统.....李文强 华祖耀 (319)

54. The Emulating System Prototype over Macro Economic Data Warehouse
 ...杨文川 郁文生 朱武杰 刘 洋 德 妍 (324)
55. 某型导弹及其测试设备维修训练系统设计与实现.....
张启信 杨大龙 路 涛 王 辉 (330)
56. 基于半实物的数字和物理混合仿真系统研究.....吴 强 (336)
57. 基于 HLA 的作战仿真体系结构设计.....刘晓明 沈 新 黄 松 (341)
58. 10MW 高温气冷堆仿真支持系统网络通信研究.....周 娟 董玉杰 石 磊 (346)
59. 单相电压型 PWM 逆变器的 MATLAB 仿真.....夏 玲 (351)
60. 用 Simulink 对电路过渡过程进行仿真分析.....张新燕 阿不都·热西提 (356)
61. 艇用机枪射击模拟器研究.....李永进 施朝健(360)
62. 卫星移动通信系统仿真软件设计.....杨 锴 刘 刚 吴诗其 (365)
63. 基于 Vega 的民用飞行模拟器视景仿真中键盘控制视点方式的开发...
柏艺琴 贺怀清 (370)
64. 基于 MATLAB 的系统仿真教学软件的设计.....王 松 (376)
65. 分布式计算在可视化仿真中的应用研究.....段德丰 钟慧娟 刘肖琳 (382)
66. 基于 Fuzzy-PI 控制的直流调速系统仿真.....彭 飞 刘 昆 (387)
67. 基于 OpenGL 的实时多分辨率 VR 系统立体显示实现.....钟慧娟 史美萍 (393)
68. 基于 SNMP 的网络管理仿真系统的设计.....宋 强 (398)
69. 基于多 Agent 的作战仿真公共支撑平台架构研究.....张马九 马亚平 (402)
70. 基于模型驱动体系结构的新一代 HLA 研究.....何 明 刘晓明 郑 翔 (408)
71. 基于智能主体的海战仿真平台设计与实现.....傅调平 陈建华 刘玉树 (414)
72. 一种新型 HLA 联邦的设计及实现.....何 明 刘晓明 郑 翔 (420)
73. 500MW 超临界火力发电机组仿真机简介.....余圣方 刘树清 陆 喆 (427)
74. 复杂产品虚拟样机技术研究.....陈 曦 吴慧中 (432)
75. 基于 SIMULINK 的 PWM 功率放大器电路仿真.....赵述芳 孙江生 张仿跃 (438)
76. 基于 VR 技术的水利水文可视化防洪预警系统的研究.....张 翌 余 轮 (444)

四、航天与装备仿真

77. 无人直升机神经网络姿态控制系统设计与仿真.....王 辉 (449)
78. 微型飞行器模糊行为控制自主飞行仿真研究.....郑祥明 昂海松 (457)
79. 变速热动力鱼雷运动的仿真建模.....罗 凯 党建军 王育才 (465)
80. DCOM 技术在炮兵射击仿真系统中的应用.....
唐 克 蒋 兵 花传泉 李 明 (471)
81. 多管火箭发射与飞行动力学仿真系统研究.....唐 克 花传泉 蒋 兵 (475)
82. K-H 多体理论在火炮通用动力学建模中的应用.....花传泉 蒋 兵 唐 克 (480)

83. 潜艇运动数学模型的仿真与实验分析.....徐亦凡 陈 克 张本文 (484)
84. 空战战法训练系统目标机飞行轨迹实现.....梁鸿飞 范广才 董彦非 (489)
85. 地地战役战术导弹突击军用港口毁伤仿真研究.....路 涛 张启信 姜一辉 (494)
86. 卫星 CDMA 系统链路级性能仿真.....张 静 苟定勇 吴诗其 (501)
87. LEO 卫星系统中两种馈信链路切换算法研究.....刘严静 (506)
88. LEO/MEO 星间链路可通性建模与仿真.....杨海涛 赵洪利 (511)
89. 基于装备作战仿真法的单坦克作战效能评估研究.....汤再江 王精业 舒秀利 (517)
90. 无人机远程控制仿真系统中的三维可视化.....郝红雨 余德义 (525)
91. 一种强化学习算法应用于多移动机器人的觅食实例研究.....任 赓 陈宗海 (530)
92. 基于 MATLAB 的星载空间目标跟踪控制系统仿真研究.....徐小琴 孙华燕 (536)
93. 水面舰艇编队导弹攻防对抗仿真试验平台研究.....范高俊 陈建华 (541)
94. 基于马尔可夫链的战场导弹抢修仿真模型.....贾永祥 李继良 朱建平 (546)
95. 有源诱偏抗击反辐射导弹(ARM)问题研究.....朱建平 陈国华 贾永祥 (551)
96. 虚拟战场环境中 CGF 动态路径规划研究.....侯学隆 饶永红 刘文庆 (558)
97. 面向目标火力配系优选的权重决策.....周广正 柳 鹏 (564)
98. 运载火箭控制系统全数字仿真.....敬晓刚 李 辉 徐利梅 (569)
99. 舰炮通用火控系统建模与仿真.....孙东彦 潘红华 徐 明 (576)
100. 动态战场电磁环境分布式仿真测试系统.....邸晶荔 赵红云 杨 萃 (583)
101. 激光欺骗干扰设备仿真测试方法研究.....李金亮 张志远 (588)
102. 末制导雷达数学仿真试验.....许章波 王明波 (594)

五、控制决策及其它

103. 基于理想九点五态控制器的三角波跟踪.....王 振 刘彦春 邱国廷 (599)
104. The Design and Analysis of a Mobile Robot System with Open Architecture
.....陈春林 周光明 陈宗海 (605)
105. A Study on Measurement in Quantum Control.....董道毅 张陈斌 陈宗海 (612)
106. 基于改进的灰色 BP 神经网络的区域物流成本预测.....张凤荣 金俊武 (618)
107. 基于 ANFIS 的混凝投药控制系统.....张 刚 师奕兵 (625)
108. 供应链管理仿真决策的进展.....庄 宇 赵 燕 管述学 胡 启 (631)
109. 极点配置控制器设计与仿真.....杨冶杰 (638)
110. 基于 Delphi 的持久化层的设计与研究.....王 俊 于爱荣 曹 雷 (644)
111. 植物生成软件的评价和比较.....王 海 林 杉 黄心渊 (651)
112. CSTR 系统的鲁棒控制器设计.....胡玉娥 (657)
113. 基于遗传算法的递归神经网络非线性自适应控制器.....沈清波 (662)
114. 基于对角递归神经网络的非线性内模控制.....胡玉娥 (667)

115. 磁悬浮轴承变结构控制研究·····	吴 刚 张育林 刘 昆	(673)
116. 未知环境下移动机器人基于主动探测思想的自主探测算法·····	·····周光明 贾梦雷 陈宗海	(679)
117. 永磁偏置混合磁轴承控制系统设计与仿真·····	肖 凯 张育林 刘 昆	(686)
118. 基于活动星空模拟器的星敏感器仿真测试系统·····	李怀锋	(691)
119. 基于 VRML 的远程设备维护系统中若干关键问题的研究·····	程 军 郝丽娜	(700)
120. 强化学习在移动机器人导航上的应用·····	卓 睿 陈宗海 陈春林	(706)
121. 基于 RLS-TD 和值梯度的强化学习方法用于 LQR 控制问题·····	·····文 峰 陈宗海 陈春林	(715)
122. 量子最优控制研究综述·····	吴庆林 陈宗海 董道毅	(723)
123. 基于最优近似反馈的图像检索·····	赵海英 彭 宏	(729)
124. 以太网在变电站自动化系统通信控制器中的应用·····	戴 雷 温阳东	(737)
125. 销售风险管理探讨·····	郭金礼 李承义	(743)
126. 二次电池的计算机检测系统的研究·····	徐晓冰	(747)
127. 坚持以人为本的教育理念, 促进学生全面发展·····	尉德芳 孟祥发	(751)
128. 通用串行总线外设固件的开发·····	黄长喜 徐朝农	(756)
129. 浅议新形势下实施的本科生班主任、班导师制·····	孟祥发 黄长喜 尉德芳	(760)
130. CAN 总线在汽车车身控制中的应用·····	朱 敏 刘勤勤	(766)

定性定量仿真技术的研究

陈宗海 黄元亮

(中国科学技术大学自动化系, 合肥, 230027)

摘 要: 在定性仿真中, 删除预测的系统奇异行为分支是仿真界面临的一个非常棘手问题, 也是不得不解决的问题。充分利用系统的定量信息和系统的其它可用知识来删除冗余行为分支是一种可行解决上述难题的方法, 国内外的科研工作者在这方面作了大量的研究, 本文主要介绍在定性定量仿真方面发现相对成熟的研究成果。

关键词: 定性仿真; 奇异行为; 定性定量仿真; 灰色定性仿真; 模糊定性仿真; 定性推理

Research on Qualitative-Quantitative Simulation

Zonghai Chen Yuanliang Huang

(Dept. Automation, the University of Science and Technology of China, Anhui, Hefei, 230027)

Abstract: In qualitative simulation, it is very difficult for the simulating domain to refute spurious behaviours predicted, and must be solved. Utilizing fully the quantitative information and other usable knowledge to solve above question is a feasible method and the researchers in world have obtained many results about qualitative-quantitative simulation. This paper mainly introduces the relatively mature theory.

Keywords: Qualitative Simulation; Spurious Behaviours; Qualitative-quantitative Simulation; Grey Qualitative Simulation; Fuzzy Qualitative Simulation; Qualitative Reasoning

1 引言

系统仿真是作为分析和研究系统运行行为、揭示系统动态过程和运动规律的一种重要手段和方法, 随着系统科学研究的深入和控制理论、计算技术、计算机科学与技术的发展而形成的一门新兴学科。定性定量仿真技术作为解决知识不完备复杂系统的仿真和决策问题的有力武器, 已被广泛地应用于科学研究、国防军事、医疗诊断、生态评估和资源开发等各种领域。在这里我们主要在简介定性仿真的基础上, 着重介绍当前国内外定性定量相结合的仿真技术的发展水平。

定性仿真是建立在 Kuipers 于 1986 年在文章“定性仿真”(Qualitative Simulation, QSIM)中提出的仿真算法 QSIM 的基础之上的, 是一种面向约束的仿真算法。它根据不完备知识系统的定性微分方程(Qualitative Differential Equation, QDE)和系统的初始条件来预测系统的所有可能的定性行为。所有系统的定性行为构成了一棵定性状态树, 系统的一个行为是一个定性状态序列:

$$\{state(t_0), state(t_0, t_1), state(t_1), \dots, state(t_n)\}$$

它是状态树从根结点到叶结点的一条路径。定性仿真预测出的结果是一个行为集合，在这个行为集合中，一些行为反映了系统的客观行为，一些行为是系统的潜在可能行为，另一些行为则是由于系统信息不足而产生的不可能行为，或者称为奇异行为。产生奇异行为的一个重要原因就是缺乏约束某些变量变化方向的信息，也就是说，这些变量的导数除了具有连续性外不再有其它的约束，从而导致了它们发生摆动，产生一些无用且难以控制的行为分支。

消除 QSIM 产生的奇异行为分支的研究一直是定性仿真研究的难题。1991 年，Kuipers 和 Chiu 在总结他们研究成果的基础上，在文献[8]中系统的介绍了两种克服变量摆动的方法：高阶导数约束和改变定性描述的水平。1994 年，Kuipers 和 Clancy 在文献[20]中提出模型分解理论。1996 年，Kuipers 和 Clancy 在文献[19]中又提出了两种处理摆动变量的方法：摆动箱分离（Chatter box abstraction）和动态摆动分离（Dynamic chatter abstraction）。这些方法都没有从根本上解决仿真的行为分支的产生的问题。

A. C. Say 和 H. L. Akin 在文献[12]中指出：众所周知 QSIM 是完全的，没有一个与系统的初始状态和其 QDE 能够匹配的系统行为会被遗失，然而由于这种算法会产生奇异行为分支，它是不完备的。是否可以通过补充新的过滤器来达到使一种仿真器在纯定性输入的状态下产生没有奇异行为分支的预测结果呢？至今没有肯定的回答。我们证明了这种既充分又完全的定性仿真算法是不存在的。

由于纯定性的仿真算法存在一些本身无法克服的缺陷，为了有效地精炼定性仿真算法产生的系统行为分支，科研人员渐渐将研究方向转向系统定量信息的应用之上。

2 Q_2 和 Q_3 仿真器

D. Berleant 在应用定量信息删除在定性仿真中系统奇异行为分支方面作了大量的研究，先后推出了两种定性定量仿真器 Q_2 和 Q_3 。

仿真器 Q_2 是补充系统的区间信息给 QSIM 算法，其中采用的定性定量知识集成的方法是：基于区间的推理方法，系统的定量信息以区间的形式在系统的约束中进行传播。在系统的定量信息的传播过程中，系统的一部分奇异行为被删除，变量的定性路标值被缩小。信息传播的方式分为：

- (1)在算术约束中传播；
- (2)在单调函数中传播；
- (3)在量空间中传播；
- (4)在时间点传播。

在仿真器 Q_2 的基础这上，D. Berleant 又开发出了一种新的仿真器 Q_3 。仿真器 Q_3 使系统的定性定量信息的结合达到了一个较高的层次。其基本原理是：步长精炼。

步长精炼是一种自适应离散化方法，这种方法已发展成适合对不确定值的区间表示。其算法分以下六步：

- (1)定性仿真；
- (2)定量信息传播；
- (3)设置间隙；

- (4)插入一个新状态;
- (5)提炼定量区间;
- (6)循环。

3 NSIM: 定性模型的数字行为包络

H. Kay 和 B Kuipers 于 1993 年提出一种比仿真器 Q_2 更好的方法, 即动态包络。这是通过一个限制系统半定量定性微分方程(semiquantitative qualitative differential equation, SQDE)的极值系统(Extremal system)推导和仿真, 能更充分地利用系统的定量信息, 并能产生比 Q_2 更紧的函数边界。

我们用一个例子来说明这种思想。设系统的定性微分方程为:

$$\begin{aligned} A' &= c - f(A), \\ B' &= f(A) - (B) \quad f \in M^+ \end{aligned}$$

若由系统的半定量信息我们知道: $\underline{c} < c < \bar{c}$, $\underline{f} < f < \bar{f}$, 则对应的极值系统为:

$$\begin{aligned} \underline{A}' &= \underline{c} - \bar{f}(\underline{A}) \\ \underline{B}' &= \underline{f}(\underline{A}) - \bar{f}(\underline{B}) \\ \bar{A}' &= \bar{c} - \underline{f}(\bar{A}) \\ \bar{B}' &= \bar{f}(\bar{A}) - \underline{f}(\bar{B}) \end{aligned}$$

在许多情况下, 由此系统产生的数值边界比 Q_2 产生的边界要紧得多。

然而, 由于 NSIM 是用区间来表示系统的不确定性的, 并且忽略了各变量界之间的相互关系和 SQDE 的相互关系, 其结果不可避免的仍具有奇异行为分支。

4 模糊定性仿真

根据仿真器 Q_2 的约束传播原理, Qiang Shen 和 Roy Leitch 将模糊数学的相关知识引入 QSIM 算法, 建立了一种定性定量仿真算法: 模糊定性仿真(Fuzzy Qualitative Simulation, FuSIM)。与 QSIM 算法类似, 模糊定性仿真在假设系统变量是时间的连续函数的基础之上, 以一组系统变量、变量间的约束和系统的初始状态出发, 产生系统变量的后继状态, 然后进行约束过滤。由于其引入系统的定量信息和 Q_2 中的定量信息传播技术, 相应地可以减少一部分系统的奇异行为分支, 并提高仿真结果对系统的描述能力。在此算法中, Q_2 中提出的系统变量在某个特定状态的持续时间被应用来删除系统的行为分支, 即时序过滤技术, 使得仿真结果中系统行为分支相对减少。这种仿真算法的基本原理分:

(1)状态描述

由正凸模糊数的子集组成的集合 Q_F 是其系统变量的定性取值空间, 系统变量在某一时间内的模糊定性状态为 $QS(x, \Delta T)$ 是一个二元组 $\langle A, B \rangle$, $A, B \in Q_F$, 其中 A 为模糊量值, B 为模糊变化速率, ΔT 为变量 x 在此状态的持续时间, 三者的关系好下:

$$\textcircled{1} \text{ 如果 } 0 \notin B_\alpha, \text{ 那么 } \Delta T = \alpha \left[\frac{W(A)}{|B|} \right], \text{ 这里 } |B| = \begin{cases} B & B >_\alpha 0 \\ -B & B <_\alpha 0 \end{cases};$$

②如果 $0 \in B_\alpha$, 那么 ΔT 没有定义。

其中 B_α 表示 B 的 α 截, $W(A)$ 表示模糊数 A 的宽度。

(2)状态转换

状态转换是指系统变量从一个状态变化到另一个状态, 在模糊定性仿真中有四种可能的转换。设变量 x 的两个相邻状态分别为 $\langle A_1, B_1 \rangle, \langle A_2, B_2 \rangle, A_1, B_1, A_2, B_2 \in Q_f$, 则有

① $A_1 = A_2, B_1 = B_2$ N 转换

② $A_1 \neq A_2, B_1 = B_2$ M 转换

③ $A_1 = A_2, B_1 \neq B_2$ R 转换

④ $A_1 \neq A_2, B_1 \neq B_2$ MR 转换

(3)过滤技术

由模糊定性仿真算法是在系统变量是连续的条件下实施的, 由各变量当前状态产生的后继状态将受到相应的约束。模糊定性仿真算法采用了三种过滤技术: 一是采用参数间的约束进行过滤; 二是利用持续时间和到达时间进行过滤; 三是应用系统的其它知识进行全局过滤。

模糊定性仿真合理地应用了系统的定量知识和时序过滤技术, 这使得它比 QSIM 的仿真结果所含的系统奇异行为分支要少得多, 但它仍未完全摆脱 QSIM 的影响, 还带有较大的不确定性。

5 SQSIM: 半定量仿真器

1998 年, H. Kay 结合仿真算法 QSIM、NSIM 和 Q_2 , 提出了一种新的仿真算法: SQSIM (SemiQualitative SIMulation, SQSIM)。SQSIM 是一种对既包含参数的不确定性又包含函数的不确定性的常微分方程 (ODE) 进行表示和仿真的方法, 其预测结果与系统模型的不确定性是严格相容的。

基于 QSIM 对 ODE 的表示方法, SQSIM 对系统的不确定性采用了多重表示的方法, 共分三重, 它们分别为:

• 结构层(Structural level)

在这个水平上, 描述 ODE 的形式是状态变量和它们间的关联函数。

• 定性层(Qualitative level)

在这一水平上, 不仅补充了模型变量的取值域的信息, 也补充了函数约束的一些性质。每个模型变量被划分成“路标值”集合。QDE 也记载着其中函数形状的信息。

• 定量层(Quantitative level)(SQSIM)

在这一水平上, 记载模型的不确定性。有两类模型不确定性:

—— 参数值不精确的模型不确定性;

—— 变量间的函数关系不精确的模型不确定性。

在 SQSIM 中, 采用数值区间去限制参数值不精确带来的不确定性, 用静态包络表示函数的不确定性。

在完成了系统的描述之后, 对系统进行预测。这一过程分三步进行:

• 定性推理

应用 Kuipers 的 QSIM 算法, 得出系统的所有可能定性行为。

- Q_2 — 进行半定量推理

由于 QSIM 算法忽略了定量层的信息, 它产生了与系统 QDE 相容的所有的系统行为, 自然也包含了与 SQSIM 不相容的行为。将系统的定量信息应用于 QSIM 产生的定性行为树之上, 应用 Q_2 进行半定量推理, 可以删除一些行为分支, 对预测结果起到精炼作用。

- NSIM — 进行定量推理

通过应用定性模型作为在每个定性时间点产生定量区间方程的一个框架, Q_2 建立了在定性与定量之间的桥梁。极大化和极小化 SQDE 中的每一个微分方程, NSIM 根据 QDE 构建了一个极限系统。由这些极限方程构成了系统新的 ODE 系统, 在这个系统中, 其状态变量是 SQDE 中状态变量的上下界, 应用这些精确的 ODE 系统来代替原来的不确定的系统。由于新的系统是一个 ODE 系统, 对其可以采用常用的仿真方法进行仿真而得到系统的边界。这些边界一般要比 Q_2 产生的边界要紧。

- SQSIM — 结合不同水平的推理

SQSIM 通过结合 QSIM、 Q_2 和 NSIM 来减少对不确定系统预测的不确定性。它以 QSIM 为仿真的基础, 在仿真的每一个时间点上, 运行 Q_2 和 NSIM 产生事件和动态包络, 每一种被描述在下面的结合方法被运行直到关于 Q_2 事件的确定点被发现。若无矛盾发现, SQSIM 算法将产生当前状态的后继状态并重复这个过程。

SQSIM 结合 QSIM、 Q_2 和 NSIM 通过下面四种方法:

- ① 动态包络交集

对 Q_2 产生的两个事件 (Event) 的动态包络与由 NSIM 产生的边界求交。

- ② 事件交集

NSIM 的动态包络与 Q_2 的事件描述求交。

- ③ 极值检测

极值检测器确定在变量动态包络中的极值, 并确信在 QSIM 的描述中存在对应的极值点。

- ④ 阶数约减

应用 Q_2 产生的动态包络去控制 NSIM, 使得 NSIM 算法不会产生已经由 Q_2 决定的上界或下界, 并设这些边界的导数为 0, 从而降低了极限系统的阶数。

SQSIM 是一种运行在状态到状态的基础之上, 并运用当前和以前的状态去精炼系统行为的一种仿真算法。它的模型和预测结果有下性质:

- 预测的系统行为是由定性行为、事件和动态轨迹包络构成的一棵状态树;
- 结果包含了 SQDE 中的所有真实行为;
- SQDE 能够像描述参数的不确定性一样来描述函数的不确定性;
- 模型的不确定性应用参数的取值范围和未知函数关系的静态包络来表示。

它的这些性质使得它具有更广的应用范围。

6 GQSIM: 灰色定性仿真

我们在分析现行定性定量仿真实理论的基础之上, 结合灰色系统理论、概率论中处理系统