

中国工程科技论坛

# 航天工程与仿真技术

Hangtian Gongcheng Yu Fangzhen Jishu



高等教育出版社·北京  
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

## 内容简介

本论坛报告的主题是“未来 20 年航天工程与仿真技术的机遇与挑战”。报告全面回顾了过去 20 年仿真技术在航天工程中的应用；讨论了航天工程的发展趋势和对仿真的需求；探讨了仿真技术发展的总体情况及其与相关学科技术领域的联系；研讨了未来 20 年仿真技术发展的主要方向，分析了面临的难点和挑战；探讨了有利于仿真技术发展的保障机制，提出了相关的措施和建议。本论坛围绕航天器的研制、发射、测控、管理和应用等环节，在系统分析、方案设计与性能评估、仿真技术需求、飞行器动态性能检测等方面进行了充分研讨，并指明了我国未来 20 年航天工程的发展方向和对仿真技术的迫切需求。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

航天工程与仿真技术 / 中国工程院编著. -- 北京 :  
高等教育出版社, 2013. 1  
(工程科技论坛)  
ISBN 978 - 7 - 04 - 036550 - 4

I. ①航… II. ①中… III. ①航天工程 - 仿真 - 研究  
IV. ①V4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 018023 号

### 总 策 划 樊代明

策划编辑 王国祥 黄慧靖 责任编辑 朱丽虹  
封面设计 顾 斌 责任印制

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  
开 本 850mm × 1168mm  
印 张 5.25  
字 数 88 千字  
插 页 1  
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.landracom.com>  
<http://www.landracom.com.cn>  
版 次 年 月第 1 版  
印 次 年 月第 次印刷  
定 价 60.00 元

## 编辑委员会

主任:王子才

副主任:赵沁平

委员:包为民 黄培康 李伯虎 刘永才 于本水  
钟山 肖田元 高战军 范桂梅

# 目 录

## 第一部分

中国工程院常务副院长潘云鹤院士致辞 .....	3
-------------------------	---

## 第二部分

综述 .....	王子才	7
----------	-----	---

## 第三部分 专家报告及专家简介

对航天器仿真技术发展的思考 .....	包为民	17
半实物仿真 .....	王子才	24
复杂系统高效能仿真技术的初步研究 .....	李伯虎	34
两化融合战略中的仿真技术 .....	肖田元	48
虚拟现实技术在工业中的应用 .....	赵沁平	56
协同仿真 - 智能专家系统技术研究与应用 .....	钟 山	60

## 第四部分 附录

附录 1 部分参会人员名单 .....	73
附录 2 媒体报道 .....	75
后记 .....	77



# 第一部分

中国工程院常务副院长  
潘云鹤致辞



# 在中国工程院第 138 场工程科技论坛 “航天工程与仿真技术”上的致辞

潘云鹤

2012 年 5 月 29 日

尊敬的各位领导、各位院士、各位专家、各位老师、各位同学：

大家上午好！

今天，由中国工程院主办，信息与电子工程学部、中国系统仿真学会及桂林航天工业学院共同承办的中国工程院第 138 场工程科技论坛——“航天工程与仿真技术论坛”开幕了。我谨代表中国工程院向出席会议的院士、专家学者、国家有关部委的领导，以及企业代表表示热烈欢迎！向对本次论坛给予大力支持的中国系统仿真学会和桂林航天工业学院表示衷心感谢！

本次论坛，以“未来 20 年航天工程与仿真技术的机遇与挑战”为主题，将分析我国航天事业的发展对仿真技术的巨大需求，探讨航天工程仿真面临的重大机遇和挑战，研究应对挑战的主要对策。

在过去 40 多年中，航天工程与仿真技术发展迅速，在中国和世界的航天事业发展中发挥了重要作用。航天已经成为一个对国家安全、科技进步、经济和社会发展具有重要意义的行业。同时，它也需要高投入，面临高风险。因此，科学的、系统的仿真实理论和仿真方法是航天工程重要的发展基础与动力。

除了航天之外，我国的仿真技术在航空、制造、土木工程、灾害防治等领域都有重要应用并取得了很大的成绩。如 5 月 18 日新闻称美国的空中优势面临的巨大威胁是中国研发了十分便宜的飞行模拟器，价格只有飞机的 1/10，每年可运行 6000 小时，训练高性能战机的飞行员格外有用。我们相信随着我国计算机、图形学、传感器、虚拟现实等技术的快速发展，仿真技术在航天工程等各个领域所发挥的作用，一定会越来越大。

中国工程院工程科技论坛自 2000 年以来已走过了 12 年的历程，创造了自己的学术品牌，在中国社会各界，特别是工程科技界产生了积极的影响。此次工程科技论坛为第 138 场。我们将一如既往，努力营造宽松自由的学术交流环境，关注工程科技中重大的方向性、前沿性问题，为提高我国工程科技创新能力和管

理水平,为推动多学科交叉、新兴边缘学科的发展,为促进经济和社会又好又快的发展,为鼓励优秀科技人才的合作与成长,做出我们中国工程院应有的贡献!

此次工程科技论坛得到了中国系统仿真学会的大力支持。作为中国科学技术协会下属的一级学会,中国系统仿真学会团结和组织我国广大系统仿真科技工作者,为促进科学技术的繁荣、发展、交流、普及和推广,为国民经济建设和国防现代化服务做出了重要贡献。

此次工程科技论坛还得到了承办单位桂林航天工业学院的大力支持。2012年4月27日教育部和自治区人民政府批准同意学校升级为本科院校。桂林航天工业学院是一所以工学为主,管理学、人文学和社会学等多学科协调发展,以培养应用型人才为特色的高等工程院校。我们祝愿桂林航天工业学院朝着高水平研究型大学的办学目标胜利前进!

最后,我希望通过对航天工程与仿真技术深入的讨论,进一步为中国航天发展的战略提出科学的建议。我再次代表中国工程院对参加本次论坛的全体院士、专家、代表,向为本次论坛付出辛勤劳动的全体工作人员表示衷心的感谢!预祝此次论坛取得圆满成功!

谢谢大家!



**潘云鹤** 1970年毕业于上海同济大学建筑学系。现任中国工程院常务副院长(正部长级),兼任国务院学位委员会委员、中国科学技术协会顾问、中国图像图形学学会名誉理事长等职。中共中央十六届、十七届候补委员。是中国智能CAD和计算机美术领域的开拓者之一。长期从事计算机图形学、计算机辅助设计技术、人工智能和工业设计的研究,在虚拟现实、计算机美术、智能CAD、计算机辅助产品创新、数字文物保护和数字图书馆等领域,承担过多个重要科研课题,取得了一批研究成果,产生了良好的经济效益和社会效益。发表有关论文多篇,多次获得国家、省部级科技奖励。1997年当选为中国工程院院士。

## 第二部分

### 综 述

---



# 综 述

## 一、论坛背景

2012年5月29日,第138届中国工程院工程科技论坛“未来20年航天工程与仿真技术的机遇与挑战”在广西桂林召开。参会人员有:中国工程院潘云鹤院士/副院长、中国工程院王子才院士、李伯虎院士、于本水院士、黄培康院士、刘永才院士、钟山院士、中国科学院包为民院士、中国系统仿真学会赵沁平理事长、广西壮族自治区和桂林市有关领导、中国系统仿真学会和桂林航天工业学院相关人员,以及听众230余人。在为期一天的论坛中,共有8位院士和专家做了精彩的报告,论坛取得了圆满成功。

本次论坛的研讨主题是“未来20年航天工程与仿真技术的机遇与挑战”,就我国航天事业发展对仿真技术的需求进行了深入分析,探讨了仿真工程面临的机遇和主要挑战,提出了应对挑战的对策等。论坛报告全面回顾了过去20年仿真技术在航天工程中的应用,总结了取得的主要成就、经验和未来20年仿真技术发展的展望;讨论了航天工程的发展趋势和对仿真的需求;探讨了仿真技术发展的关键领域及其与相关学科技术的关联;研讨了未来20年仿真技术发展的主要方向,分析了面临的技术挑战和难点;探讨了有利于仿真技术创新的保障机制,提出了相关的措施和建议。

## 二、整体情况

仿真技术研究一直是伴随航天系统工程发展起来的重要领域,过去半个世纪以来为中国和世界的航天事业发展做出了重要贡献。航天技术已经成为对国家安全、经济发展、社会进步具有重要意义的高科技、高投入、高风险的技术领域,必须依赖于科学的仿真实论、仿真方法和仿真实验结果的支持,以获得解决问题的有效手段和发展动力。在此科技发展的大背景下,论坛就我国航天未来20年的发展和对仿真技术的要求进行了充分的研讨。

上午的报告由于本水院士主持,中国科学院包为民院士、中国工程院王子才院士和李伯虎院士就航天器仿真技术的发展、半实物仿真技术和高效能仿真技术做了精彩的演讲,并回答了听众的提问。下午的报告由李伯虎院士主持,刘永才院士、肖田元教授、黄培康院士、赵沁平教授和钟山院士分别就两化融合战略

中的仿真技术、虚拟现实技术、智能专家系统技术等方面做了精彩的演讲。论坛进行得紧张有序,气氛热烈,到下午6点30分,第138届中国工程院工程科技论坛圆满结束。

航天工程仿真基于物理效应模型和(或)采用按飞行器运动学、空气动力学及轨道动力学有关原理建立的数学模型,进行相关的模拟试验与分析工作。航天工程仿真是系统仿真技术与航天工程相结合的产物,是现代仿真技术的一个重要分支。本次论坛围绕航天器的研制、发射、测控、管理和应用等各个环节,在系统全面分析、方案设计与性能评估、仿真技术需求、飞行器动态性能与检测等方面进行了充分研讨,并指明了我国未来20年航天工程的发展方向和仿真技术的迫切需求。

### 三、主要观点

#### (一) 包为民院士

包院士首先指出:航天仿真技术是系统仿真技术与航天工程技术的结合,航天工程体系仿真是分析、验证航天工程体系综合性能及效能的一种重要手段。航天器系统仿真由其发展历程可以分为三种类型:第一种是已经比较成熟的系统级仿真,第二种是近10年迅速发展的多系统多自由度的联合仿真,第三种是仍处于探索阶段的全系统多物理仿真。

接下来,包院士就航天器仿真技术体系的需求与构想做了深入分析。主要从航天器性能仿真技术的作用、航天器仿真技术体系的需求、航天器仿真试验体系的构想三个方面进行了论述。包院士认为:

(1) 在航天器设计方案论证阶段,航天器性能仿真技术的主要作用是根据总体任务要求,分解各系统的指标要求,各系统根据指标要求建立数学/仿真模型,开展系统级验证。

(2) 航天器仿真技术主要包括分系统仿真与建模技术、多物理场耦合的总体仿真技术以及高效协同的仿真技术。我们应该在总结50年来航天仿真技术发展的基础上,运用航天器仿真技术,以高性能计算集群为基础,构建航天器工程仿真体系,实现航天器多系统、多物理场耦合、分布式、异构集成协同仿真平台。

(3) 航天器仿真试验需要进行四个方面的研究:一是研究分层逐级验证与总体集成协同验证相结合的方法;二是采用机理模型和专家经验相结合方法;三是研究智能优化和云仿真技术;四是研究多物理场耦合加载试验方法。

最后,包院士对航天器仿真涉及的关键技术进行了总结。分别从多物理场



耦合复杂系统建模技术、虚拟飞行试验设计及验证技术、仿真模型校核辨识及修正技术、和航天器仿真共性支撑技术四个方面进行了论述,为未来开展航天器仿真指明了方向。

## (二) 王子才院士

王子才院士承接包为民院士的关于航天工程对仿真技术的具体需求,重点就半实物仿真技术做了报告。首先,对国内外仿真技术的发展进行了综述,回顾了我国航天事业及仿真技术的科研历程,论述了仿真技术在航天、航空、航海、电力、核能、反恐等领域不可替代的重要作用。

然后,王子才院士以美国国防部先进仿真实验室的导引头微波暗室仿真为例,介绍了半实物仿真系统的组成和各项关键技术,包括仿真模型、仿真设备、仿真接口、仿真实时性和仿真可信度等。在论述过程中,王院士列举了很多国内外的应用实例,如飞行转台系统、分布式仿真网络、美国 SIMNET 仿真计划等。王院士认为仿真可信度是非常关键的一环,仿真系统的评估和管理人员逐渐认识到仿真系统开发的各个阶段都对仿真可信度有重要的影响。因此对仿真系统可信度评估是仿真系统全生命周期中的一项工作。

之后,王子才院士重点论述了半实物仿真设备(转台)的相关技术。介绍了转台系统的材料与结构、支撑系统、驱动技术、控制技术等内容,还通过图片视频等展示了 2 轴、3 轴、5 轴、红外和水下等多种转台实物,帮助听众直观地了解了半实物仿真设备。

接下来,王子才院士就半实物仿真的应用进行了论述。王院士在精确打击武器仿真、火星 500 项目、模拟驾驶与格斗训练、电站设备仿真、交通仿真等方面,阐述了半实物仿真的应用领域。

最后,王子才院士就未来 20 年的发展前景,展望了半实物仿真技术的发展方向,提出了高超声速飞行器仿真、航天器空间环境仿真、航天人员的任务模拟和培训三个研究方向。王院士认为,未来 20 年半实物仿真技术面临新的挑战,同时也给我们带来了机遇。相信 20 年后,通过努力,我国仿真技术将在航天工程、深空探测等领域跻身世界前列。

## (三) 李伯虎院士

李伯虎院士论述了复杂系统高效能计算机仿真技术。首先,李院士提出复杂系统高效能计算机仿真技术是融合高效能计算技术和现代建模与仿真技术,以优化复杂系统建模、仿真运行及结果分析等整体性能为目标的一类建模仿真技术。进而从满足复杂系统高端建模仿真及为海量用户按需提供云高效仿真服

务两类用户及其三类仿真类型(数学、人在回路、硬件在回路)的角度,讨论了发展复杂系统高效能仿真技术的技术需求及简介了相关的技术概况。接着,李伯虎院士基于其研究团队正在进行的“复杂系统高效能计算机仿真技术研究”项目,从高效能仿真建模技术、高效能仿真计算机系统及支撑技术、高效能仿真应用工程技术等三个方面论述了有关的 10 类关键技术:在仿真建模技术方面,重点介绍了团队研制的复杂系统建模仿真与优化语言 Cosim - CsMSL,包括仿真语言结构框架、复杂系统建模技术、高效动态并行化编译技术和参数化、组件化模型库/函数库技术及三级复杂系统高效能并行算法库技术等。在仿真计算机系统及支撑技术方面,论述了高效能仿真系统体系结构;基于多 CPU/多 GPU 的模块化计算节点,基于 GPU/FPGA/DSP 的专用加速部件,基于 GPU 群的高速可视化子系统,高速通信、协同、I/O,半实物接口系统,并行存储系统等高效能仿真计算机硬件技术;支持三级并行的并行操作系统技术,高效能并行化编译技术,仿真系统内成员级并行软件,高效能云仿真技术等高效能仿真软件支撑技术。在应用工程技术方面,李院士就海量数据(大数据)处理技术、复杂系统计算机仿真实验结果管理分析与评估技术等几个方面进行了阐述。

最后,李伯虎院士就计算机仿真技术的发展给出了几点建议。认为高效能计算机仿真技术是人类认识和改造世界的重要手段,是我国实现创新型国家战略目标的重要技术,它的发展需要高效能建模与仿真计算机系统的体系结构、硬件、软件、算法和应用的综合推动。

#### (四) 刘永才院士

刘永才院士就航天工程信息化仿真做了报告(略)。

#### (五) 肖田元教授

肖田元教授就两化融合战略中的仿真技术做了报告。肖教授首先指出,在中央的信息化与工业化融合的发展战略中,仿真技术在各个领域发挥了重要作用。肖教授从仿真在两化融合中的作用、虚拟制造加速产品创新能力提升、虚拟制造加速产品创新案例和两化融合需要发展仿真技术这四个方面展开了论述。

肖教授认为,仿真技术在我国制造业发展过程中已经得到很多应用,且实际上仿真技术是信息化与工业化融合的典型技术。信息化与工业化融合就应该大力推广应用仿真技术,全面系统地应用仿真技术。创新能力,就是对客观世界的新认识、新发现的能力,作为信息时代认识世界的第三种方法,仿真可以也应该为加速产品创新能力的提升做出重要的贡献,同时也需要进一步发展仿真技术来适应两化融合的需求。

肖教授进一步指出,在两化融合阶段,虚拟制造成为人们关注的热点。特别是对很多发达国家来说,虚拟制造从 90 年代开始已经得到广泛应用,逐渐成为产品全生命周期的核心技术。虚拟制造的典型例子是波音 777 的开发。波音 777 还没有生产的时候,整个虚拟样机及其制造过程已经在计算机上完成了。所有虚拟部件都进行了远距离实时集成测试,采用虚拟加工单元模仿制造过程,包括 CNC 机床刀位轨迹、铆接机翼的机器人运动轨迹等。开发周期从过去 8 年缩短到 5 年。虚拟制造不但为现代制造提供超越人们已有的知识、经验来认识世界的技术手段,而且可实现产品的技术、知识的沉淀与积累,从而为持续提高创新能力提供有效支持。

接下来,肖教授根据前面的讲述,形象地列举了两个虚拟制造加速产品创新的案例。一是应用虚拟制造技术,突破逆向工程仿制的思路,研制了真正具有自主知识产权的产品。二是应用虚拟制造技术,在 863 计划的支持下,开发出协同设计、仿真、优化一体化平台,基于设计的三维模型,实现 8 节车体及其悬挂系统一系、二系的弹簧、阻尼器、钩缓等进行多种工况下的协同仿真,为我国的高铁建设提供了强有力的技术保障。肖教授认为,中国的制造企业经过 20 余年的信息化后,许多企业可以而且应该广泛而深入地应用虚拟制造技术,以加速形成具有自主知识产权的高附加值的产品,从而加速从“制造大国”到“制造强国”的转变。

然后,肖教授指出:信息化与工业化融合的基本特征是 3I,即物联化、互联化和智能化。3I 的支撑技术是 3C 融合,即通信、计算与控制。随着工业化和信息化的融合发展,3C 融合产生了一类新型系统,即 CPS(Cyber Physical System)。2007 年,美国总统科学技术顾问委员会在《挑战下的领先—竞争世界中的信息技术研发》的报告中列出了 8 个大关键的信息技术,CPS 位列首位。且在所有的有关 CPS 的报告当中,几乎都认为 CPS 的建模与仿真技术是其研究与开发的关键,这是值得我们仿真科技工作者关注的。CPS 建模与仿真对仿真技术提出了新的挑战。

最后,肖教授对其报告进行了总结。肖教授认为,在两化融合发展战略中,产品创新是我国制造业重要的发展战略,虚拟制造是一种能有效支持产品创新的先进仿真技术,可为加速我国从制造大国到制造强国的转变提供有力的技术支持。CPS 将推动工业产品和技术的升级换代,甚至会重新排列现有产业布局,CPS 的建模与仿真技术是其研究与开发的关键支撑技术,也是仿真技术研究的热点和重要的发展方向,值得关注。

## (六) 黄培康院士

黄培康院士在雷达观测目标特性的仿真方法研究方面做了报告(略)。

## (七) 赵沁平教授

赵沁平教授就虚拟现实技术在工业中的应用做了报告。首先,赵教授从两个方面说明了虚拟现实的作用。一是对计算机系统发展的贡献,二是应用角度的贡献。虚拟现实作为一门学科交叉的应用科学技术,是计算机系统与各应用领域的接口,可以为各行业的规划决策、设计评价和训练体验等提供新的平台和手段。虚拟现实对各应用领域的作用,类似于数学对于物理学的作用。

虚拟现实是一种技术,也是一种方法或技术路线。由于其重要性,越来越受到一些发达国家的重视。美国工程院公布了经评选产生的 21 世纪人类在工程技术领域所面临的 14 个重大挑战性问题,其中之一是“提升虚拟现实的逼真性和应用性”。英国政府发布了针对 2015~2020 年的 8 个新兴科学技术集群的战略报告,其中 6 个直接含有模拟、建模、仿真、虚拟的内容。日本政府发布了长期战略“创新 2025”报告,描绘了 2025 年日本的 18 个创新愿景,“虚拟现实”是其中之一。我国政府颁布的“国家中长期科学和技术发展规划纲要”把“虚拟现实技术”作为信息领域优先支持的三个前沿技术之一。

之后,赵教授介绍了其课题组开发的指挥模拟训练系统、六自由度全任务飞行模拟器、北京奥运会开幕式节目创意仿真示例、60 周年国庆阅兵方案规划决策系统和虚拟手术训练平台等,并播放了视频演示。

接下来,赵教授重点讲述了虚拟现实技术在工业中的应用,包括众多知名汽车厂商将虚拟现实技术用于产品设计、虚实融合飞机驾驶舱仪表布局评估系统、虚拟维护工具和虚实融合的航空发动机维护系统、枪弹过程模拟等。同样的,赵教授也播放了典型虚拟现实应用的视频演示。

最后,赵沁平教授认为虚拟现实技术在工业的应用过程中,存在如下几个必须重视解决的问题:

- (1) 明确现代工业的应用需求;
- (2) 各类数据的获取;
- (3) 物理与行为建模;
- (4) 模型的可信性;
- (5) 传感器网络;
- (6) 人机交互机制与交互设备;
- (7) 与 CAD 系统的结合;
- (8) 工业应用效果的评价。

## (八) 钟山院士

钟山院士就协同仿真-智能专家系统技术的研究与应用做了报告。首先,钟院士指出,军事新技术的智能化发展已成为必然趋势,是军事现代化的重要标志之一。人工智能是与生物工程和空间技术齐名的当今世界三大尖端技术之一。实践表明,利用人工智能技术,可以大大地提高武器装备研制、生产、使用与维护的效率;武器装备数字化、自动化、智能化,是现代武器装备作战效能的倍增器。

之后,钟山院士阐述了协同仿真-智能专家系统平台的体系结构和应用模式,讲解了平台的支撑层、服务层和应用层(包括应用工具层和应用层)三个层次,以及实时在线模式、离线模式和人机交互模式三个应用方式。

钟院士重点讲述了协同仿真-智能专家系统需突破的几项关键技术,包括知识获取技术、不确定知识推理技术、仿真引擎与推理引擎集成技术和面向服务的知识网格技术等。钟院士认为,因果图模型具有重要的工业应用价值,Bayes故障树推理机对知识推理研究具有促进作用等。

接下来,钟院士讲述了其课题组开发完成的协同仿真-智能专家系统/工具集 V1.0 版本,包括交互式知识获取工具、系统建模工具和通用的故障监控器。演示了大量工具的运行情况和界面,并就预测、诊断、评估这一典型应用流程讲解了工具的使用。讲述过程中,钟院士引用了一个雷达制导过程的故障诊断实例。

最后,钟院士对智能专家系统的研究进行了展望。钟院士认为,下一步的主要工作包括:

(1) 结合复杂产品研制的特点和应用需求,继续深入研究平台的相关关键技术,包括多模式智能化推理与融合算法;多领域知识获取与融合技术;多领域知识统一建模与联合求解技术;知识构件服务网格等关键技术。

(2) 以关键技术研究为基础,进一步完善支持复杂产品设计和试验智能化系统开发的平台/工具集。

(3) 以平台为依托,研究智能化设计和试验应用技术,拓展平台在复杂产品工程研制中的应用阶段和应用领域;同时以应用为牵引,研究建立智能化设计和试验系统相关的标准规范。

## 四、小结

航天系统工程仿真是仿真技术领域中最重要的发展方向之一,通过本次论坛的深入广泛研讨,凝聚了航天大系统工程仿真发展共识,提出了可行的航天大系统工程仿真发展思路,形成了更加有利于航天系统工程仿真发展的共识,将有力推动仿真技术全面服务于我国航天事业未来的发展。



## 第三部分

专家报告及专家简介





# 对航天器仿真技术发展的思考

包为民

中国航天科技集团公司

**摘要:**航天仿真技术是指系统仿真技术与航天工程技术的结合,为航天器、航天运输系统和导弹武器系统的综合性能效能评估、体系对抗、指控及作战训练、故障诊断、运行管理等提供数学或半实物的验证手段和模拟平台。航天器仿真技术主要包括分系统仿真与建模技术、多物理场耦合的总体仿真技术以及高效协同的仿真技术。本文系统总结了航天器仿真技术发展,基于对航天器仿真技术的剖析,论述了航天器仿真技术体系的需求与构想,阐述了航天器仿真技术涉及的关键技术,并对现代信息技术在航天器仿真技术中的应用进行了展望。

## 一、概 述

航天仿真技术是指系统仿真技术与航天工程技术的结合,为航天器、航天运输系统和导弹武器系统的综合性能效能评估、体系对抗、指控及作战训练、故障诊断、运行管理等提供数学或半实物的验证手段和模拟平台。航天仿真技术分为航天工程体系仿真和航天器系统仿真两大类。其中,航天工程体系仿真是分析、验证航天工程体系综合性能及效能的一种重要手段,目前该项技术总体上还处于起步阶段,但在某些领域如攻防对抗、多武器平台仿真中已经取得了一些阶段性成果,并在武器系统定型中得到了初步的应用。仿真模型的准确度和颗粒度是体系仿真面临的主要问题,基于现有技术水平要建立非常精确的模型,难度是非常大的。而航天器系统仿真根据其发展历程可以分为三种类型:第一种是已经比较成熟的系统级仿真,广泛应用于型号和研制过程中,主要用来考核验证系统设计的准确性,航天控制系统半实物仿真和数学仿真均属此类;第二种是近10年迅速发展的多系统多自由度的联合仿真,其主要作用是进行系统间匹配行为的验证,例如我国的“天宫一号”与“神舟八号”的交会对接任务就需要通过该种仿真进行系统匹配和正确性验证;第三种是仍处于探索阶段的全系统多物理场仿真,其主要作用是对全系统综合性能效能进行验证与评估,可以用于导弹的总体性能的仿真,但目前理论方法和应用技术都有很多问题需要解决,在型号阶

段运用较少。

## 二、航天器仿真技术体系的需求与构想

航天工程体系仿真需要攻克的难题主要是模拟真实战场和空间环境,为航天器、导弹武器的定型和实战化提供支撑。由于缺乏全面系统的规划和基础研究支持,所以出现工程仿真技术孤岛和关键技术攻关得不到持续支持的问题。同时我国仿真技术的研究与航天工程型号研制的结合不够紧密,缺乏协同发展、全过程支撑。目前某些发达国家,如美国航天器仿真技术的应用已覆盖概念设计、详细设计、制造、使用等全过程。另外,传统的试验手段和能力已经不能满足航天器的发展对仿真技术的需求,仿真技术亟待创新,这些都是面临的主要问题。当前,需要研究的具体内容有:如何解决全过程、多因素、强耦合航天器的仿真技术;如何在飞行子样受限的情况下,依靠仿真手段验证设计包络的真实性;如何进行充分的地面仿真试验,降低航天器飞行验证的风险,同时通过飞行数据修正仿真模型,提高系统仿真的置信度。

### (1) 航天器性能仿真技术的作用

在航天器设计方案论证阶段,航天器性能仿真技术主要作用是根据总体任务要求,分解各系统的指标要求,各系统根据指标要求建立数学/仿真模型,并且开展系统级验证。同时,总体根据各系统间的耦合模型建立飞行器总体级、多学科仿真验证模型,重点开展各分系统间的耦合性能验证,验证总体指标分解的正确性,并评估飞行器性能是否满足任务要求。在工程研制阶段,根据各分系统半实物仿真试验的结果,构建总体层面的实物仿真验证平台,并围绕飞行包络内的特定任务,开展总体层面的全系统紧耦合的仿真试验,一方面可以检验各系统间的匹配性和性能指标的合理性,另一方面也可以验证总体性能指标的可实现性。如图 1 所示。

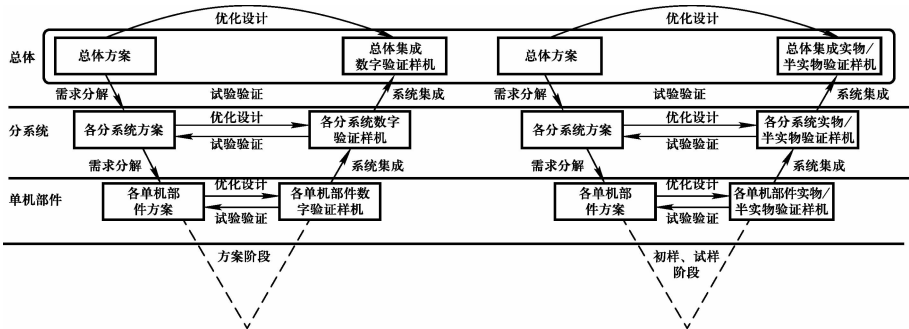


图 1 航天器性能仿真技术的作用

## (2) 航天器仿真技术体系的需求与构想

航天器仿真技术主要包括分系统仿真与建模技术、多物理场耦合的总体仿真技术以及高效协同的仿真技术。其中,分系统仿真与建模主要包括气动力仿真建模、动力系统仿真建模、结构系统仿真建模、控制系统仿真建模和大气环境仿真建模等。多物理场耦合仿真主要考虑了总体/气动布局/控制间耦合、气动力/热耦合、气动力/热/结构耦合和力/热/结构/控制(伺服)耦合等。高效协同的仿真技术由快速、并行计算技术,分布、异构协同计算技术,及耦合加载技术三部分组成。在总结 50 年航天仿真技术发展的基础上,运用航天器仿真技术,以高性能计算集群为基础,构建航天器工程仿真体系,实现航天器多系统、多物理场耦合、分布式、异构集成协同仿真平台,如图 2 所示。通过这种仿真平台可以把各个分系统的仿真模型集成在一起进行仿真,实现航天产品的全系统仿真、航天器运行出现故障时的远距离仿真等,支撑工程实现问题的远程快速决策。

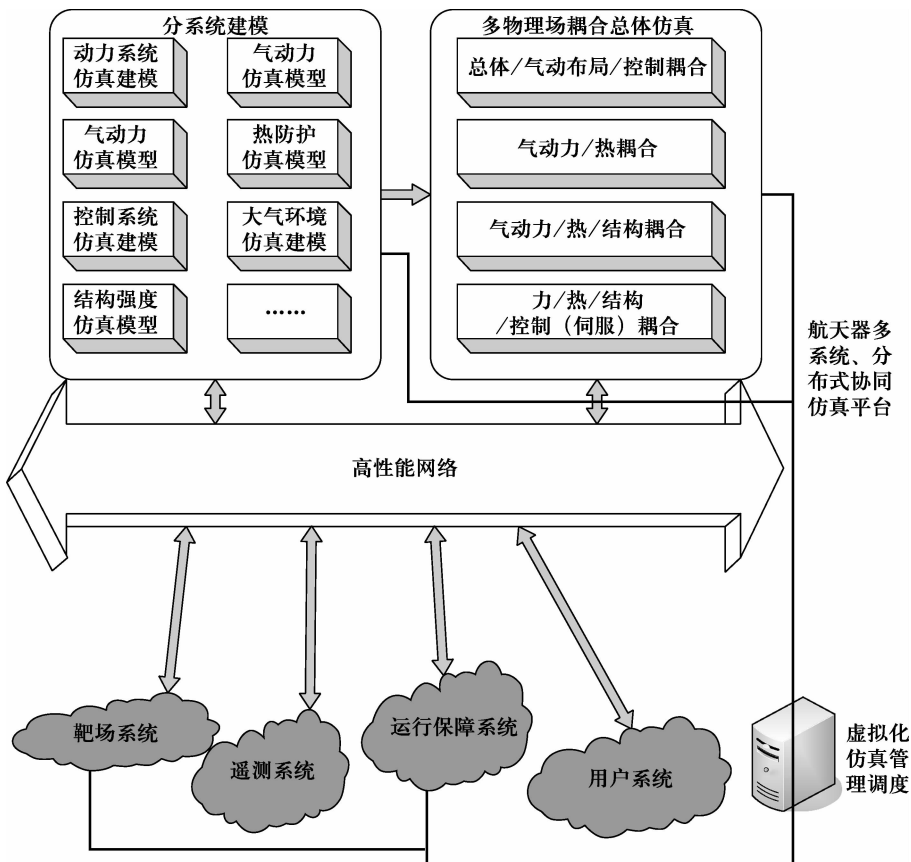


图 2 航天器多系统、分布式协同仿真平台

### (3) 航天器仿真试验体系的需求与构想

从方法学的角度来看,航天器仿真试验需要进行四个方面的研究:一是研究分层逐级验证与总体集成协同验证相结合的方法,即分系统的验证及其与总体的结合;二是采用机理模型和专家经验相结合的方法,确定试验状态,验证航天器设计的飞行包络;三是通过智能优化和云仿真技术,依托高性能计算及网络技术的支撑,建立高效的仿真试验调度方法;最后是通过研究多物理场耦合加载试验方法,对试验手段进行创新。

以总体性能半实物仿真实验系统的构建为例,首先需要解决分布式计算及调度管理问题,需要采用大型高性能计算系统的计算资源,同时还要进行调度管理协同软件的开发;其次是总体仿真模型问题,如规划总体性能仿真平台,建立多学科耦合仿真模型;第三要考虑仿真模拟设备的问题,主要包括多自由度运动模拟装置、目标及环境模拟装置、多物理场耦合模拟、测控信道模拟等;最后是实物产品的开发,主要由星/箭系统、测发控系统、测控系统、信息支撑等构成。

## 三、航天器仿真涉及的关键技术

在航天器仿真技术发展的过程中,涉及若干关键技术需要解决,主要包括多物理场耦合复杂系统建模技术、虚拟飞行试验设计、验证技术,仿真模型校核、辨识及修正,航天器仿真共性支撑技术等。

### (1) 多物理场耦合复杂系统建模技术

多物理场耦合复杂系统建模研究需要重点开展具有以下耦合特性的航天器建模技术的研究:即总体、气动和控制耦合,气动力/热耦合,气动力/热/结构耦合,力/热/结构/控制(伺服)耦合,还有多体运动、复杂结构的仿真技术。面对这种复杂的多物理场耦合关系,需要通过建模来刻画和描述飞行器实际飞行状态,提高仿真验证的准确度。多物理场耦合关系如图3所示。

### (2) 虚拟飞行试验设计、验证技术

基于航天器仿真试验平台进行航天器飞行包络的数学及半实物仿真试验,即航天器虚拟飞行试验。虚拟飞行试验可对飞行器性能、技术指标和综合效能进行评估,同时虚拟飞行试验通过多学科、多物理场耦合建模和高效能仿真等技术,实现多维度、全系统、全剖面、全流程的飞行模拟仿真,并通过偏差状态组合、故障模式注入仿真,对系统的鲁棒性、健壮性进行综合评估,最大限度地飞行前验证设计的正确性,并挖掘系统的潜在风险。构建层次化的虚拟飞行试验应

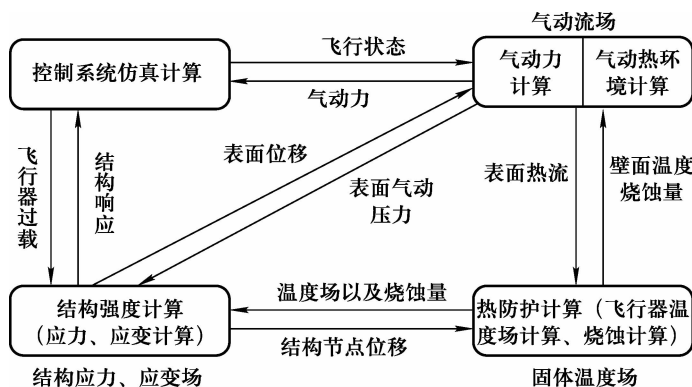


图3 航天器多物理场耦合系统

用体系,将大子样虚拟试验与小子样地面试验和飞行试验等相结合,实现仿真试验、地面实物试验、飞行试验的逐级验证和修正,提高虚拟仿真实验的真实性,最终形成虚实结合的航天器总体性能验证和评估体系,如图4所示。

### (3) 仿真模型校核、辨识及修正

仿真模型校核、辨识及修正也是航天器仿真需要解决的关键技术之一。要解决这个问题,首先需要对仿真模型进行物理及数学层次的验模,确保模型符合航天器的主要物理特征;其次通过对实物产品地面试验数据的分析,进一步验证/修正仿真模型的正确性;最后根据实际飞行试验数据进行分析对比,开展模型参数辨识,评估仿真模型的正确性,并进一步完善和修正仿真模型。通过这些手段,可以将地面仿真的数据和飞行数据一起作为武器评估的一个重要依据,从而减少飞行试验的风险。

### (4) 航天器仿真共性支撑技术

航天器仿真共性支撑技术主要包括异构软件协同技术、仿真环境支撑技术和虚拟环境技术三部分。其中,异构软件协同技术主要研究多学科协同建模的方法、异构软件和模型的协同技术,建立协同仿真模型集成框架,实现多学科异构仿真模型统一的多机并发协同仿真;仿真环境支撑技术主要研究基于分布式计算环境、高性能计算环境、半实物仿真环境的多学科、一体化、分布式、协同仿真模型的运行支撑平台;虚拟环境技术是指对自然环境和人为对抗环境的仿真建模,模拟环境效应的虚拟现实、可视化技术等。

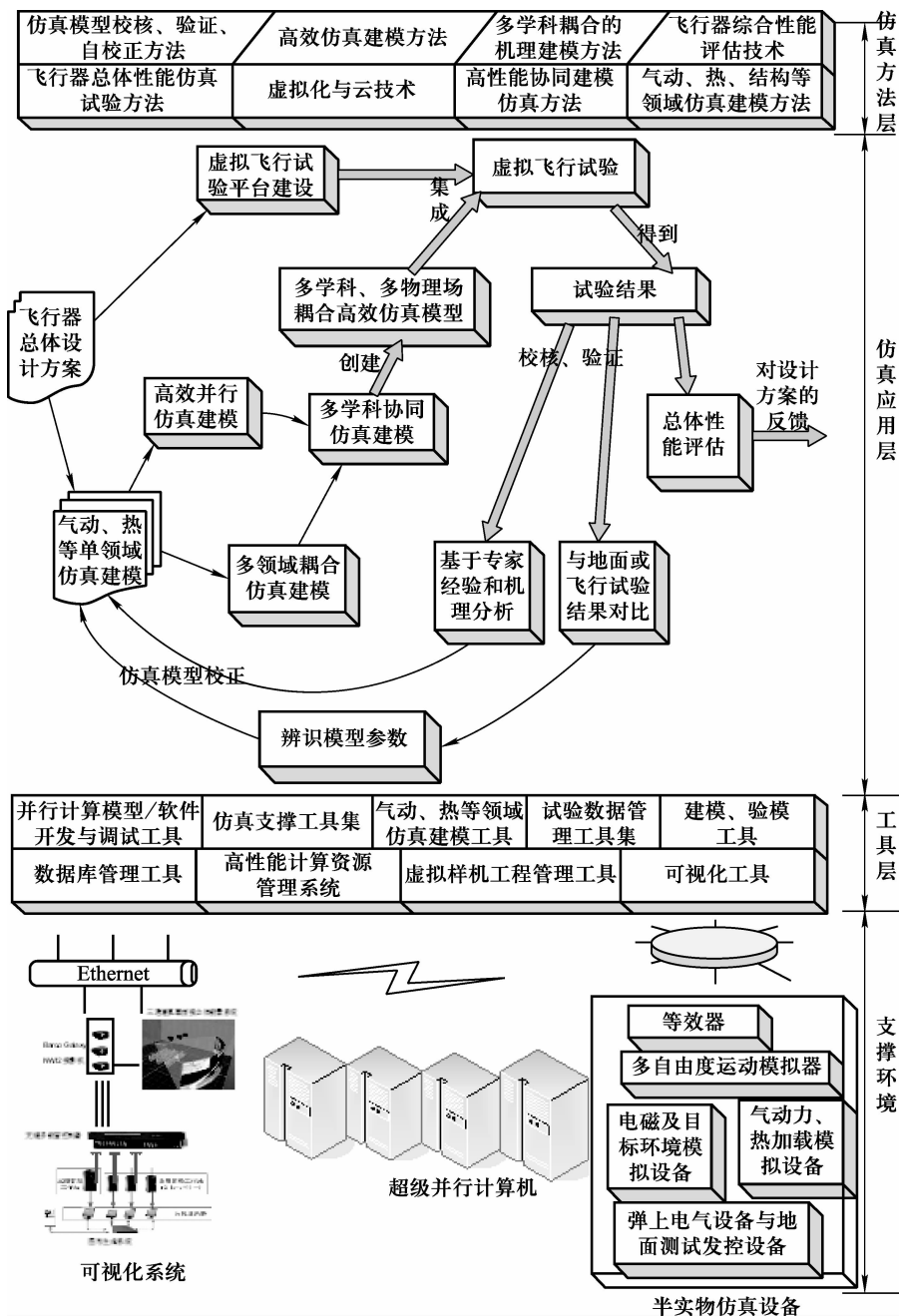


图 4 航天器总体性能验证和评估体系

此外,现代信息技术的迅猛发展也为航天器仿真提供了新的机遇和挑战,例如基于数值算法和并行技术的高效仿真建模方法、GPU 与 CPU 异构的高性能计算加速技术、云计算的系统仿真优化技术等方法,如图 5 所示。它们为航天器仿真技术的迅速发展提供了可能,需要进一步的开发和探索。

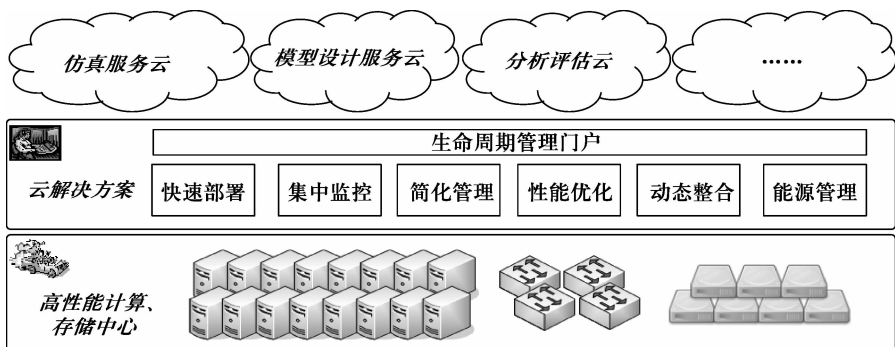


图5 现代信息技术在航天器仿真中的应用

## 四、结 论

当前,航天事业的发展对仿真技术提出了新的迫切需求,发展航天器仿真技术是提升航天系统工程设计、验证能力的最有效手段之一;现代信息技术的进步为航天仿真技术发展奠定了坚实的技术基础,但是新一代航天器仿真技术的发展仍面临众多基础问题与技术挑战。突破航天仿真的核心技术,实现仿真技术与航天系统工程的有机结合,必将推动未来航天装备建设的大发展。



**包为民** 1982年8月毕业于西北电讯工程学院,现任中国航天科技集团公司科技委主任,国家某重点工程技术总负责人,兼任总装备部科技委委员,是我国航天运载器总体及控制领域的学术带头人,973首席专家,国防科技工业有突出贡献中青年专家。先后获国家科技进步奖特等奖、一等奖,国防科技进步奖一等奖、二等奖,获国防科技工业杰出人才奖。2005年当选为中国科学院院士。

# 半实物仿真

王子才

哈尔滨工业大学控制与仿真中心

## 一、概 述

仿真技术是以相似原理、模型理论、系统技术、信息技术以及仿真应用领域的有关专业技术为基础,以计算机系统、与应用有关的物理效应设备及仿真器为工具,利用系统模型对实际的或设想的系统进行研究、分析、试验与运行的一门多学科的综合性技术。由于仿真技术在应用上的经济性、安全性、可重复性、无破坏性、不受气候条件限制、不受场地空间限制等优点,仿真技术被广泛应用于航天、航空、航海、电力、化工、核能、通信等诸多领域。以美国为代表的国家非常重视仿真技术的发展。美国陆军导弹司令部的先进仿真中心为美国计划执行署和负责为美国陆军研制并部署战术精确制导导弹和子弹药的项目官员提供半实物仿真支持。先进仿真中心成立至今已研制出十几套半实物仿真设施。这些设施包括由基于特征测量的数学模型作支持的专用信号生成设备和辐射室。它们提供微波、毫米波、红外和可见光频段内的目标特征、干扰和背景场景。在北约《未来安全环境》报告中,仿真技术被视为解决国家危机、地区危机、恐怖主义、武器扩散等安全问题的关键技术之一。

在我国,仿真技术也受到越来越多的关注。早在上世纪八十年代初由原航天部制定的航天 10 年发展规划中,仿真技术已经显现出其巨大的工程价值。特别是 1991 年北京仿真中心成立之后,仿真技术开始大量应用于航天工程。

回顾仿真技术的发展历程,上世纪 60 年代仿真技术尚处于萌芽阶段,之后步入快速发展阶段,70 年代末提出了半实物仿真技术,90 年代初又提出了分布式仿真技术。进入新世纪以来,仿真技术的发展速度明显加快,并行仿真技术、嵌入式仿真技术、云仿真技术相继进入工程应用领域。

## 二、半实物仿真

开发半实物仿真系统时,必须牢牢把握以下五个方面:仿真模型、仿真设备、仿真接口、仿真实时性和仿真可信度。



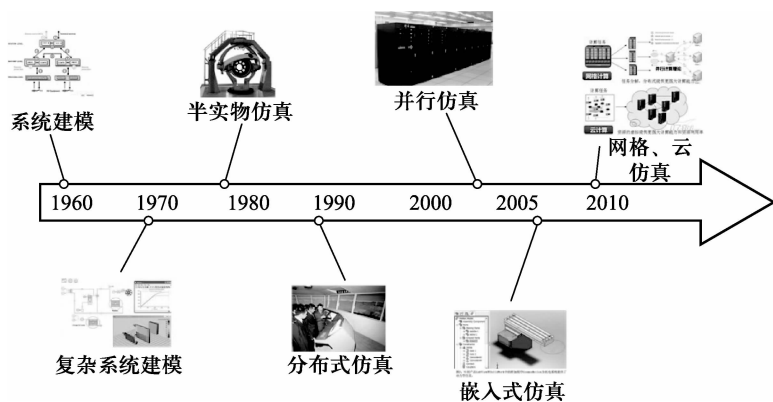


图 1 仿真技术的发展历程

### (一) 仿真模型

在系统建模方面,就半实物仿真而言,包括物理模型和数学模型。一般地,运动体(导弹、卫星、鱼类等)采用数学模型,运动体的制导与控制部分采用真实系统,而真实系统所处的环境采用物理模型,再将各部分联成一个整体。近年来,系统建模技术随着仿真应用范围的拓宽而不断发展,定性系统的建模有 Kuiper 法以及各类基于模糊理论的方法,离散事件系统及各类并发分布系统的建模有 Petri 网及 Bond 图方法,复杂系统的基于 Agent 的建模仿真方法,此外机理建模及系统辨识法、模糊优化法、人工智能辅助建模法及混合模式的建模法等。无论采用何种建模方法,均需保证模型的等效性、精确性、实时性、异构性、数值解算快速性、分辨率适度性。

### (二) 仿真设备

半实物仿真设备主要包括仿真计算机和各种物理仿真装置。仿真计算机可以是数字计算机、模拟计算机或数-模混合仿真计算机;物理仿真装置通常包括目标仿真器、负载力矩仿真器和三轴飞行转台等设备。图 2 是常见的物理仿真装置—飞行转台。

### (三) 仿真接口

仿真系统的接口包括设备接口和人-机接口,如图 3 所示。目前导弹和航天器仿真主要涉及实物系统的连接,其半实物仿真试验有两种情况:一种用于验证系统性能而尽可能多

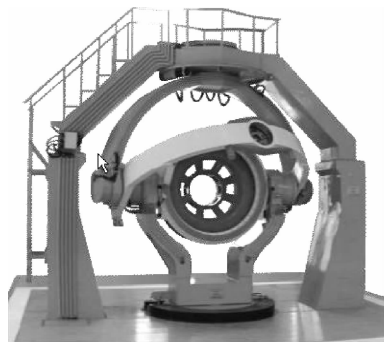


图 2 飞行转台

地接入实物的半实物仿真试验;另一种用于检验飞行软件而仅含控制计算机实物的半实物仿真实验。在进行仿真试验时,涉及的信息变换接口主要发生在仿真计算机的输入。对于第一种情况的仿真试验,仿真所引入的接口发生在仿真计算机与导航制导设备的环境仿真设备之间;而对于后一种情况的仿真试验,仿真计算机必须直接与控制计算机相连接,需要模拟导航制导设备的输出信号。目前除了一般的 D/A、A/D 接口之外,主要的信息转换接口有 D/A (或 D/D)加正弦调制、D/A (或 D/D)加脉宽调制、D/A (或 D/D)加 V/f (或 D/f)变换、D/A 加 V/I 变换、D/D 变换,其他还有一些地线、阻抗隔离电路和传输电缆。总之,接口连接中不应该引入干扰和畸变。

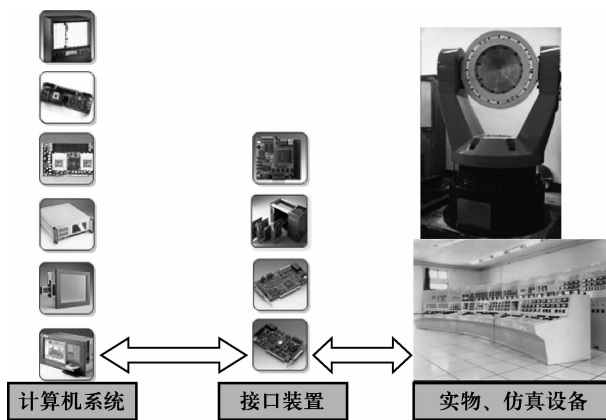


图 3 接口装置

仿真接口按使用方式也可分为集中式接口与分布式接口,如图 4 所示。集中式接口有非总线和总线两种工作模式,占用计算机运行时间,并且 I/O 处理影响模型解算,但是它具有简单易行、成本低的优点;分布式接口有专门 I/O 处理计算机,管控方便、灵活,但是它采用的是网络通讯,导致网络带宽影响实时性,而且成本高、结构复杂。

#### (四) 仿真实时性

按仿真时间和实际时间的比例关系分类,仿真可分为实时仿真(仿真时间标尺等于自然时间标尺)、超实时仿真(仿真时间标尺大于自然时间标尺)和亚实时仿真(仿真时间标尺小于自然时间标尺)。半实物仿真属于实时仿真范畴,实时性是其必要前提。例如半实物仿真系统 SIMNET,它包括 260 个仿真器、9 个训练场、2 个研究场所、以及 850 个仿真实体,所面临的实时性问题难度极大。

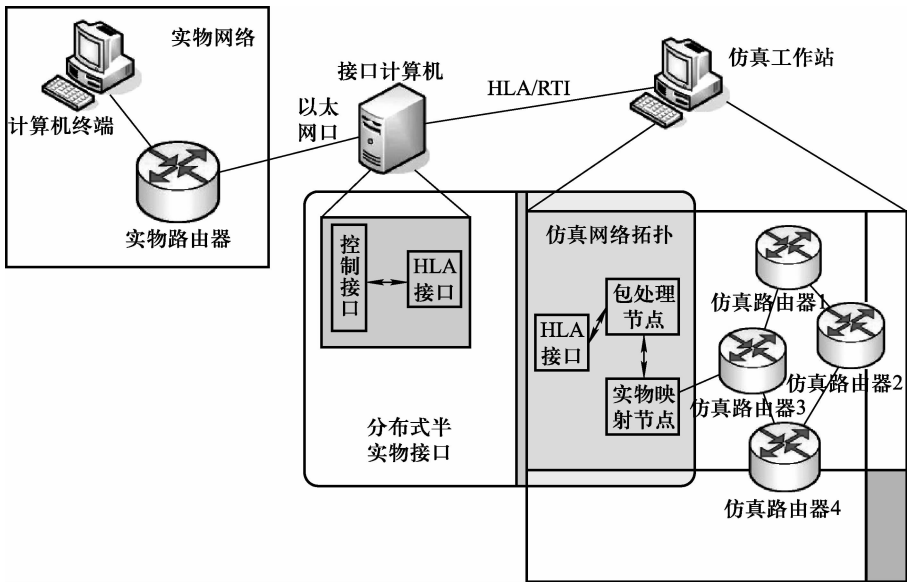


图4 分布式接口

### (五) 仿真可信度

仿真可信度是指由仿真系统与原型系统之间相似性决定的、仿真系统与仿真目的相适应的程度。仿真系统本身是由代替实际系统的模型进行模型运算的仿真软件、产生物理效应的硬件设备、人机接口界面和软硬件接口、通信软件以及开发与使用系统的人构成的复杂系统。其可信度评估研究应该从整个仿真系统角度出发,全方位地进行。随着对仿真可信度评估研究工作的不断深入,仿真系统的评估和管理人员逐渐认识到仿真系统开发的各个阶段都对仿真可信度有重要的影响,因此对仿真系统可信度评估是仿真系统全生命周期中的一项非常重要的工作。

## 三、半实物仿真设备

转台系统是惯性元器件和惯导系统测试与实验的重要设备,也是半实物仿真系统的常用设备之一,如图5所示。

转台系统主要由下述三个基本部分组成:

(1) 台体 转台的台体是机械设计部分,包括基座和轴框架。三轴飞行仿真转台有三个相对转动的框架(外框、中框、内框),三个框架轴相互垂直,分别用来仿真飞行器的航向、俯仰和滚动运动,所以也称为方位框、俯仰框和滚转框,如图6所示。台体各轴上均装有减速齿轮、驱动马达以及角运动敏感元件和高精度导电滑环,被测试件装在与内框轴固联的负载盘或支架上。为了精确地测

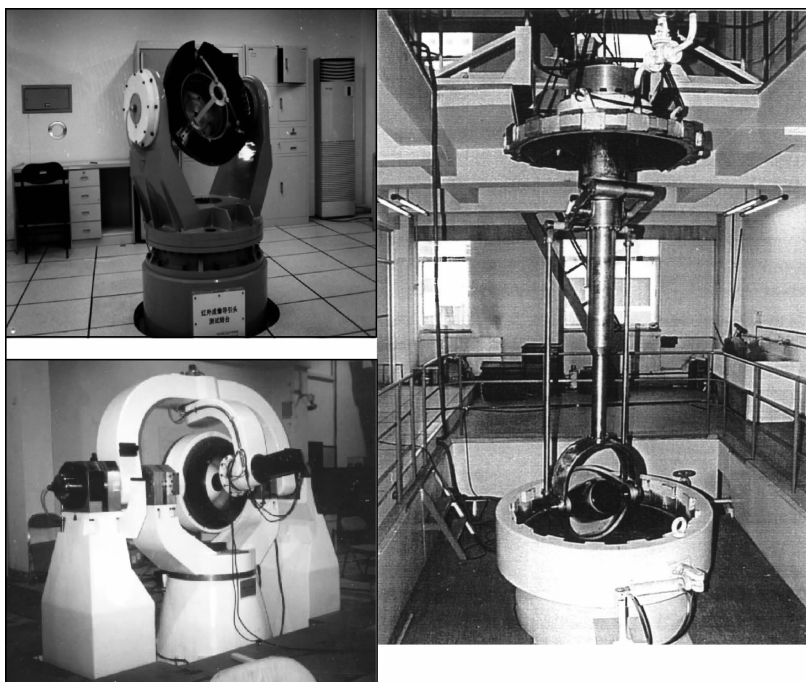


图5 仿真转台系统

量转台各个轴的转角,一般都装有刻度盘,有的甚至装有游标刻度盘。为了防止随动系统发生故障而连续旋转,撞坏被试部件,各轴装有限制转角的限位装置。减速齿轮装有消除间隙的装置。各种引线通过各轴的中心孔以避免框架转动时发生交叉和牵缠。

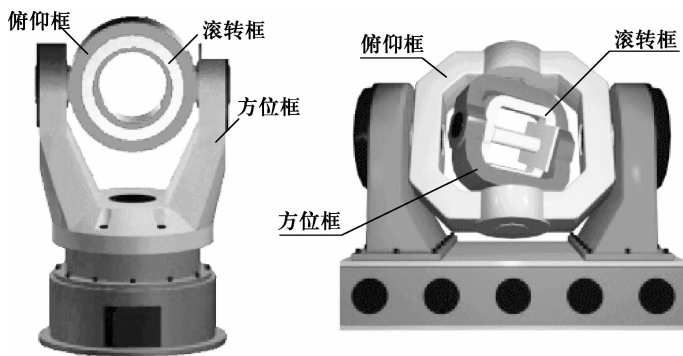


图6 仿真转台的支撑系统

(2) 控制柜 控制柜内是转台主控装置,用来控制转台台体的运动。控制柜内放置转台的控制器、监控装置和控制计算机等部件。控制计算机集中控制各个相互独立的轴通道,实现转台所有的控制功能。

(3) 动力系统 动力系统是提供台体伺服系统专用的动力装置,有两大类:一类是电动机伺服驱动;一类是液压伺服驱动。电动机驱动的优点是:电动机可实现连续回转,而摆动式液压马达则不能;液压驱动需要设置液压油源,而电动机驱动则不必。液压系统的优点是:液压马达输出力矩大且功率密度高,在同样功率条件下,液压马达的体积和重量仅为电动机的 12% ~ 20% 左右,所以适用于大负载仿真转台和小负载但通频带很宽的高频响仿真转台。并且液压马达的调速范围大,可以从最低角速度  $0.0004^{\circ}/s$  无级调到  $300^{\circ}/s$ ,其速比范围超过 50 万倍。因此,对于小负载、低频响的转台,采用电机驱动方案较佳;而对那些大负载、高频响的仿真转台,采用液压驱动为宜。



图 7 电动伺服驱动

## 四、半实物仿真的应用

### (一) 精确打击武器仿真

为了响应美国陆军导弹司令部关于全陆军在大规模导引头半实物仿真方面的经验和能力来源的要求,各种规模的全数字、混合、导引头半实物和人在回路中的仿真系统应运而生。仿真靠单一或组合利用先进的仿真处理器组合体、红外仿真系统、光电仿真系统和射频仿真系统在实时的动态环境中完成。

红外仿真系统为用于面对空、空对空和空对面导弹的红外传感器系统的设计、研制和鉴定提供一种仿真手段,工作在  $0.2 \sim 0.4 \mu\text{m}$  和  $1.0 \sim 1.5 \mu\text{m}$  波段的传感器在目标截获程序中的六自由度由混合计算机控制。光电仿真系统为各种各样的紫外线、可见光和近红外传感器系统的无损仿真提供真实和精确可控的环境。在搜索室内可控照度等级和室外环境条件下的目标时,实际传感器的六自由度由混合计算机控制。光电仿真系统还具有一个热的地形模型,它适应  $2 \sim 14 \mu\text{m}$  的红外频谱区。射频仿真系统提供在面对空、空对空、空对面和面对面作战中的被动、半主动、相干的和非相干的主动、指令、驾束、成像以及对导弹

跟踪的导弹系统的导引头半实物仿真。

## (二) 火星 500 项目

火星 500(MARS 500)是由俄罗斯组织、多国参与的国际大型试验项目,模拟从飞船发射、飞向火星、登陆火星到返回地球的全过程。该项目的目的是探索“人与环境”相互作用,了解长期密闭环境下乘组健康状态及工作能力状况。特别是获取超长时间飞行、无安全自主控制、资源有限、无法实施身体及心理特殊治疗、完成火星表面出舱活动等条件下的相关数据。

试验开始于北京时间 2010 年 6 月 3 日,结束于北京时间 2011 年 11 月 4 日。试验设计时间 520 天,前 250 天模拟飞往火星、中间 30 天登陆火星、最后 240 天返回地球。进入模拟试验舱后,所有生活用品、人员将彻底与外界隔绝。参加试验的乘组由 5 名男性和 1 名女性志愿者组成。实验设施位于莫斯科俄罗斯科学院生物医学问题研究所(IBM)。实验舱的设计充分考虑到乘组在长期狭小环境中工作、生活及安全保障的需求,共计 550 平方米,由生活舱、医疗舱、公共活动舱、火星着陆舱模拟器、轻型充气火星表面模拟舱等五部分组成,如图 8 所示。

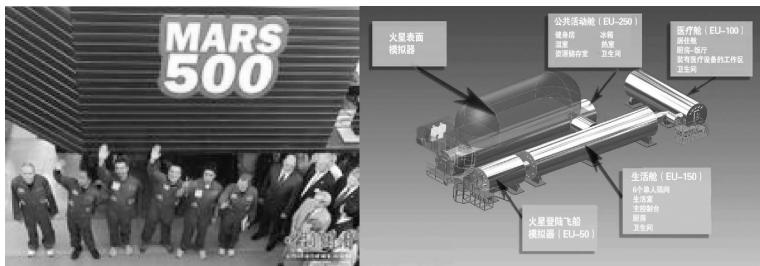


图 8 火星 500 项目

## (三) 模拟驾驶与格斗培训

一般来说,飞行模拟器由如下几个部分组成:主计算机系统、视景系统、运动与操纵负荷系统、仪表系统和音响系统等,如图 9 所示。飞行模拟器力求实现一种与真实飞行完全一样的环境,其座舱的布局及其中的仪表设备与真实飞机驾驶舱内部严格一致,运动系统用于产生加速度、颠簸等感觉,透过座舱前的风挡玻璃,飞行员可以看到模拟器视景系统实时地生成蓝天、白云、山川、机场跑道等景物,音响系统伴随着当时的飞行情况准确地模拟出各种音响效果,飞行员通过驾驶杆、方向舵及其他设备的输入均可得到与操纵真实飞机一样的力反馈,使飞行员产生高度的沉浸感,从而达到良好的训练效果。

飞行模拟器不仅可以使飞行员做正常飞行程序的训练,更为重要的是,它可

以真实地模拟发动机空中失火、控制飞行操纵系统失效、落地时轮胎爆裂等特殊情况。飞行员可以在模拟器上训练,果断正确地处理以上这些用传统飞行训练难以或根本无法实现的、但真实飞行中又很可能发生的特殊情况。不但如此,用飞行模拟器对飞行员训练完全在室内进行,不受场地、气候等条件的限制,大大降低了飞行训练的人力、物力消耗,有很高的安全性。因此,飞行模拟器已经成为当今飞行员训练不可替代的高效手段。



图9 飞行模拟器

#### (四) 电站设备仿真

电站发电机组的设备庞大,系统复杂。因此对设备研究、系统试验、参数校正、运行安全性与经济性分析、运行值班员培训等在实际发电机组上直接进行,或是很困难,或根本不可能。利用仿真技术的特点,在模型上进行试验研究,在仿真机上培训运行值班员,则上述问题可迎刃而解。

电站仿真机从使用目的和仿真范围考虑,可分为6种类型:部分任务型仿真机、基本原理型仿真机、通用型仿真机、全范围仿真机、精确复制型仿真机和基于CRT的仿真机。电站仿真机提供了一个连续的实时运行环境。它真实地仿真了

整个电站的运行工况,如图 10 所示。实现在多种工况下的机组启动、停机和正常运行的监视及操作。全部操作结果(无论是正确操作还是错误操作)都与实际电站的反应一致。

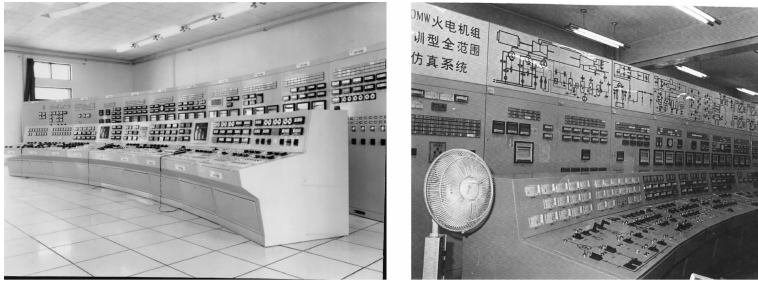


图 10 电站仿真机

正常或异常状态下的全部参数在相应的仪表、CRT 及记录仪表等设备上显示和记录。当参数达到或超过极限时,与实际电站一样,报警或逻辑联锁保护动作。

提供机组在不同运行条件下,分析和改进操作方式并进行优化的试验条件。提供正确的故障、事故现象仿真,以提高机组运行人员正确判断、处理各种故障及事故的应急能力,并为进一步改进操作方式和制定反事故对策提供手段。对机组的控制系统进行仿真试验和控制系统的参数设定。

对岗位运行人员、技术管理人员定期轮训上岗或晋升前考核,提供反映运行人员实际操作能力和分析判断能力的手段。

## 五、半实物仿真的未来

半实物仿真系统伴随着科技的飞速发展和人们对其认识的不断深入,其软硬件水平将进一步提高,从而在航天、航空等领域发挥更大作用。例如,在飞行器处于高超声速飞行状态时,其结构、飞行特性、控制特性等都会发生巨大变化,这些变化极大地阻碍了高超声速飞行器的研制,利用半实物仿真技术对高超飞行器的上述特性进行模拟,将有利于加快高超飞行器的研制速度;至少 50% 的航天器故障、66% 的火星探测器失败以及部分月球探测器失败是由于空间环境对航天器各种电磁干扰造成的,利用半实物仿真技术,可以在地面对航天器在空间环境中的运行状态进行测试,尽可能消除航天器存在的隐患;载人航天工程要求航天员能够在失重环境下进行外太空科学试验、航天器操控等,利用半实物仿真技术,可以在地面对航天器的整个飞行过程进行模拟,从而对航天员进行各种针对性训练。



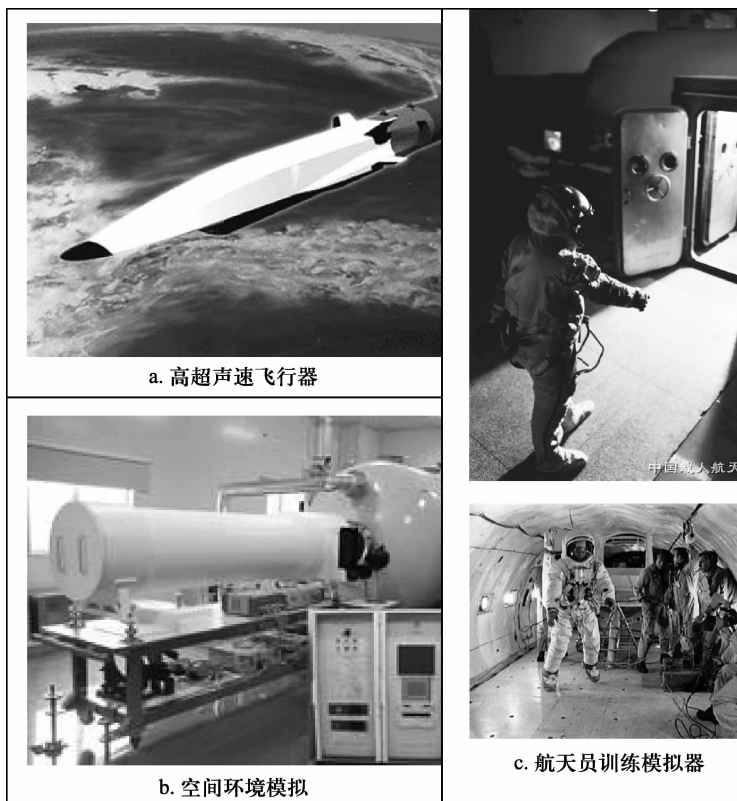


图 11 半实物仿真技术的未来应用

未来 20 年,半实物仿真技术面临着新的挑战,同时也给我们带来了机遇。相信 20 年后,我国仿真技术将在航天工程、深空探测等领域跻身世界前列。



**王子才** 1957 年毕业于哈尔滨工业大学,现任哈尔滨工业大学控制与仿真中心教授、博士生导师。是我国控制与仿真系统领域的专家,先后荣获国家科技进步二等奖、三等奖及省部一等奖;发表论文 110 余篇、著作 6 部;为我国航天领域培养了一大批优秀的博士和硕士研究生。2001 年当选为中国工程院院士。

# 复杂系统高效能仿真技术初步研究

李伯虎

航天科工集团二院

**摘要:**本文首先给出了复杂系统高效能仿真技术的含义、重要作用和研究内容,并从满足复杂系统高端建模仿真及为海量用户按需提供云高效仿真服务两类用户及其三类仿真类型(数学、人在回路、硬件在回路)的角度,讨论了发展复杂系统高效能仿真技术的 technical 需求并简介了相关的技术概况。接着,从高效能仿真建模技术、高效能仿真系统及支撑技术、高效能仿真应用工程技术等三个方面论述了当前复杂系统高效能仿真技术研究中值得关注的 10 类技术:1) 复杂系统高效能仿真语言;2) 复杂系统高效能仿真算法;3) 高效能仿真系统体系结构;4) 高效能仿真硬件实现技术;5) 高效能仿真软件支撑技术;6) 高效能仿真可视化技术;7) 高效能云仿真技术;8) 复杂系统高效能仿真系统 VV&A 技术;9) 海量数据管理技术;10) 复杂系统仿真实验及结果分析与评估技术等,包括其研究内容和作者所在团队的研究成果与进一步的研究方向。最后给出几点结论与建议。

**关键词:**复杂系统;高效能仿真;高端建模仿真;云仿真

## 一、引言

复杂系统,指的是一类具有“系统组成关系复杂、系统机理复杂、系统的子系统间以及系统与其环境之间交互关系复杂和能量交换复杂、总体行为具有涌现、非线性,以及自组织、混沌、博弈等特点的系统”。典型的复杂系统包括航空、航天、核工程系统等复杂工程系统;经济规划等复杂社会系统;人、动物、植物等复杂生命系统;气候、电磁等复杂环境系统;C4ISR、攻防体系等复杂军事系统;及互联网、物联网等复杂网络系统等。

复杂系统的研究与实施对促进国家社会经济发展、巩固加强国防建设、提高人民生活质量有着十分重大的意义。目前,复杂系统的有效研究、实验手段主要包括建模与仿真技术以及高性能计算机技术等。

在本文中,作者提出“复杂系统高效能仿真技术”概念,它是融合高效能计算技术和现代建模与仿真技术,以优化复杂系统建模、仿真运行及结果分析等整体性能为目标的一类建模仿真技术。复杂系统高效能仿真技术正成为现代建模

与仿真技术的一个研究热点。它正成为国民经济、国防建设、自然科学、社会科学等各个领域的复杂系统论证、试验、设计、分析、运行、维护、人员训练等应用层次的不可或缺的重要科学技术,也正逐步成为“计算科学”的重要组成部分(很多人认为:计算科学是与理论研究、实验研究并列的第三种认识与改造世界的重要科学研究手段)。

本文以作者所在团队的近期研究成果为基础,讨论了发展复杂系统高效能仿真技术的技术需求;并详细论述了当前复杂系统高效能仿真技术研究中值得关注的 10 类技术。最后给出复杂系统高效能仿真技术发展的几点建议。

## 二、复杂系统高效能仿真技术发展的需求

复杂系统高效能仿真技术的发展由应用需求牵引和相关技术推动。

复杂系统高效能仿真技术的应用需求主要源自于能支持“数学、人在回路、硬件在回路”等三类仿真,及“复杂系统高端建模仿真及按需提供仿真服务”等二类用户的应用需求。上述两类用户对发展复杂系统高效能仿真技术提出了许多具体的技术需求,下面将展开讨论。

### (一) 复杂系统高端建模仿真技术需求

随着各领域复杂工程系统相关学科技术的快速发展、专业计算和仿真软件复杂度的提高、复杂工程仿真和计算规模的增大,这些对复杂系统高端建模仿真技术提出了更高的技术需求,包括以下 12 个方面:

- 1) 高计算能力;
- 2) 高效、高带宽、低延迟的同步、通信网络;
- 3) 高性能、高容量、高可伸缩性的并行 I/O 系统;
- 4) 友好的复杂系统模型开发环境;
- 5) 多尺度、多学科异构系统协同运行;
- 6) 仿真系统多样本并行运行(作业级并行)、仿真系统(联邦)内成员间并行(成员级并行)、以及成员模型解算的并行(线程级并行)的“三级并行”;
- 7) 海量数据的存储与管理;
- 8) 仿真实验可信性与结果的分析评估;
- 9) 仿真结果智能化分析评估;
- 10) 高性能计算机低功耗;
- 11) 高性能计算机系统的高可靠性;
- 12) 高性能计算机系统的安全性。

## (二) 高效能云仿真中心(服务)的技术需求

高效能云仿真中心(服务)要为海量用户按需提供“在线高效能仿真云服务”,其技术需求包括:1) 高效能仿真资源虚拟化与服务化;2) 为用户提供按需动态组合的多类高效能仿真服务环境;3) 呈现给用户的是一个“虚拟化”的高效能、安全、可靠的协同仿真运行环境;4) 提供用户为中心的分布、协同、交互的仿真工作模式,如图 1 所示。

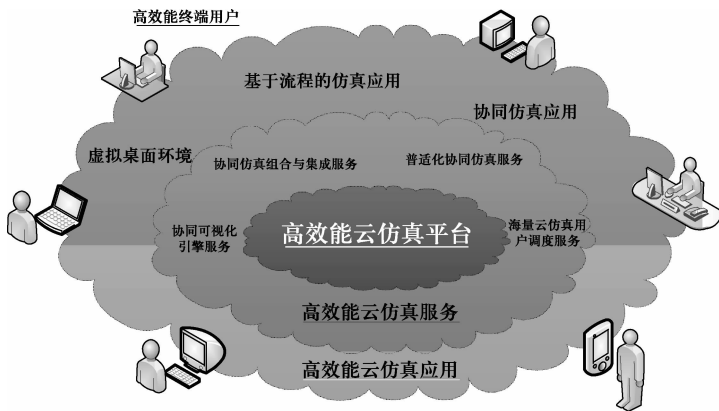


图 1 用户通过各种网络得到所需的高效能仿真服务

## (三) 相关技术的推动

### 1. 建模与仿真技术

(1) 建模与仿真技术是以相似原理、模型理论、系统技术、信息技术以及建模与仿真应用领域的有关专业技术为基础,以计算机系统、与应用相关的物理效应设备及仿真器为工具,根据研究目标,建立并运行仿真模型,对研究对象进行认识与改造的一门综合性、交叉性技术。

(2) 建模与仿真技术已成为人类认识与改造客观世界的重要方法,成功地用于航空航天、生物、材料、能源等高新技术领域和工业、农业、国防、商业、经济、教育、社会服务和娱乐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等。

(3) 现代建模与仿真技术正向“网络化、服务化、高效化、协同化、智能化、普适化”的现代化方向发展。

(4) 现代建模与仿真技术的研究热点:基于网络技术和云计算的建模与仿真技术,智能系统建模与仿真技术,复杂环境(自然/人工干扰)的建模与仿真技术,复杂系统/开放复杂巨系统的建模/仿真技术及虚拟样机工程等。

## 2. 高性能能计算技术

(1) 高性能计算技术是一类具有超高计算能力、存储能力、交互能力的计算技术。它包含:高性能处理器;并行高效计算机系统;相关并行算法及相关领域大型并行应用软件等技术。目前在高计算能力、高速通讯能力(内部)、并行计算算法与软件、低功耗、高可靠性等方面已取得较大进展。高效能计算的峰值浮点运算能力超过 1000 万亿次/秒,正积极研制万万亿次/秒的超级计算机。

(2) 高性能计算技术已在工程领域、国防安全、科学研究、国民经济、社会问题中的复杂系统高端“数学仿真”中得到成功应用。

(3) 高性能计算机技术正向“高性能、高可靠、高节能、高可用”的高效能方向发展。

(4) 当前高效能计算的研究热点包括采用多核(mulicore)、众核(many core)、GPU 和专用加速硬件提高应用系统的性能和降低功耗,可伸缩的全局并行 I/O 处理系统,高效能的编译系统和高效能的并行计算环境,以及面向领域的应用支撑软件系统等。

## 3. 要重视研究复杂系统高效能建模仿真技术

值得指出,现有的高性能计算机技术与建模与仿真技术融合得还不够,因此,现有的计算机系统还不能良好地满足复杂系统高效能建模仿真的应用需求,例如:

(1) 在体系结构方面:现有高性能计算机系统架构难以支持半实物(硬件在回路)仿真、嵌入式仿真系统及人在回路等的适时处理;

(2) 在硬件技术方面:缺少面向仿真问题求解及可视化特定需求的高性能硬件,难以实现高效仿真运行与显示结果;

(3) 在算法与软件技术方面:在许多领域,缺少面向用户的、充分挖掘仿真问题潜在并行性并充分利用高性能计算系统能力的支撑算法与友好的软件。

总体而言,还未见能支持数学、人在回路、硬件在回路三类仿真,二类仿真用户的一体化的计算机系统。因此,需要研制一种“将现有的高性能计算机技术与建模与仿真技术深度融合的复杂系统高效能建模与仿真系统”,包括研究其体系结构、硬件、软件、算法和应用。

# 三、复杂系统高效能仿真关键技术的研究

## (一) 高效能仿真建模技术方面

### 1. 复杂系统高效能仿真语言

复杂系统高效能仿真语言是一种面向复杂系统建模仿真问题的高效能仿真

软件系统。它使系统研究人员专注于复杂系统仿真问题本身,大大减少了建模仿真和高效能计算技术相关的软件编制和调试工作。基于该语言能进一步开发面向各类专用领域(如体系对抗、多学科虚拟样机仿真等领域)的高级仿真语言。下面以本团队正在进行的复杂系统建模仿真与优化语言 Cosim - CsMSL 为例来讨论复杂系统建模仿真语言的主要研究内容:

### (1) 仿真语言体系结构

高效能仿真语言通常由模型与实验描述语言、翻译/编译程序、模型库、算法库、函数库、运行控制仿真引擎及结果后处理软件等组成,如图 2 所示。

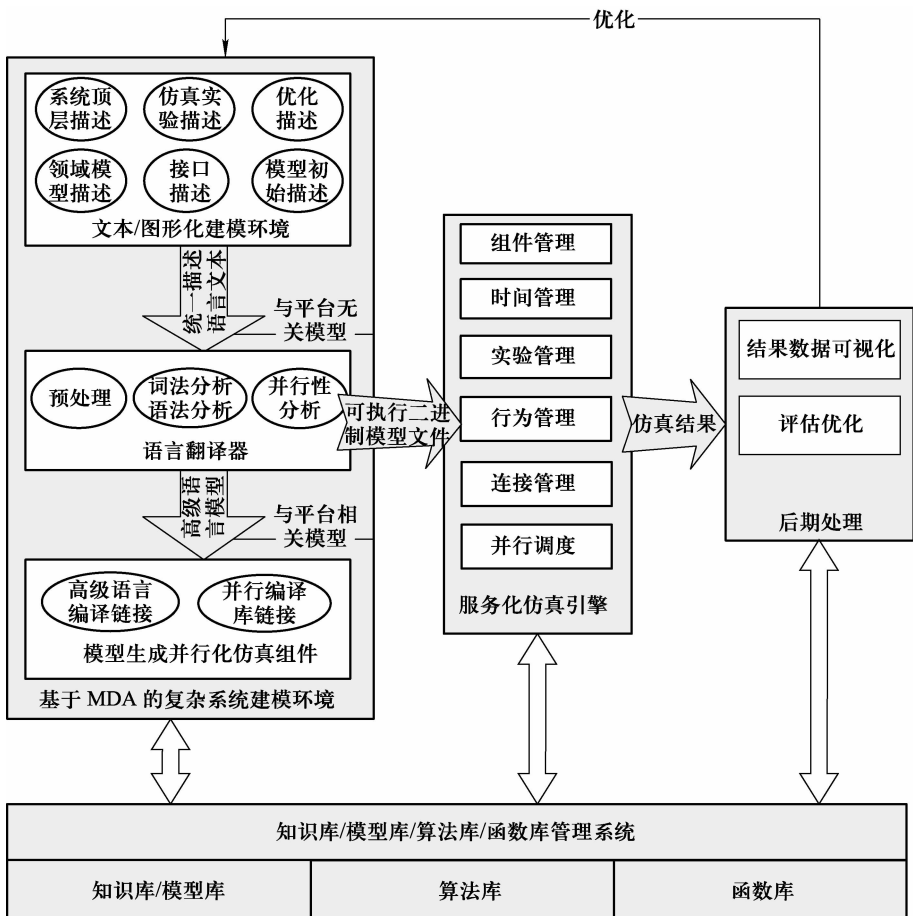


图 2 复杂系统建模仿真语言体系结构

### (2) 仿真语言中模型与实验的描述语言

仿真语言面向三类仿真,采用组件式的可扩展语言结构,由初始块、模型块和实验块三大部分组成。其中初始块主要包括各种变量、参数初始值及算法相关设置语句;模型块包括描述三类仿真的静态动态描述语句及语法,包括数学

(连续、离散)、人在回路(定性、随机)以及硬件在回路(AD/DA 转换、实时控制)等;实验块包含描述实验操作的各种语句(如加初始值、运行、停止、画图等实验)及其流程。

### (3) 复杂系统仿真建模技术

复杂系统多表现为连续离散混合、定性定量混合的系统,由于其规模大、构成和行为复杂、相关知识不完善,行为具有模糊性、不确定性、难以量化、自适应、混沌、涌现、博弈等特点,因此它对传统的建模仿真理论、方法与平台技术提出了新的挑战。值得关注的复杂系统仿真建模技术问题主要包括:定性定量混合系统仿真建模技术,基于复杂自适应系统(Complex Adaptive System, CAS)的仿真建模技术以及基于复杂网络理论与方法的复杂系统仿真建模技术。本团队主要开展了定性定量混合系统的仿真建模技术研究,其主要研究成果包括以下三个方面:1) 定性定量统一建模方法,包括基于复杂系统顶层元建模框架 M2F(Meta-Modeling Framework)的系统顶层描述方法,以及基于 Quan-Rule(定量-规则)和 Quan-Agent(定量-Agent)的层次化领域建模规范描述;2) 定量定性交互接口建模,包括基于模糊因果导向图 FuzzyCDG 的定量模型与随机性、模糊化定性知识模型的交互接口图形化建模;3) 定量定性时间推进机制,包括 QR(定量-规则)-QA(定量-Agent)混合时间推进方法。

### (4) 高效动态并行化编译技术

高效动态并行化编译技术主要包括仿真语言的词法语法分析、复杂系统问题并行性分析以及目标代码的动态并行化编译。其核心功能是实现面向高效能并行计算环境的仿真语言编译器,能够自动将仿真描述的问题分解和并行化,并链接相应的函数库、模型库和算法库。本团队采用的方法是通过分析目标机体系结构(向量机/并行多处理机)以及问题的内在特性(依赖关系/循环等价变换等),基于 C++ 文件流操作和 string 类实现文本转换,基于 OpenMP/TBB 编译指导语句和 VC 实现并行计算。本团队研究突破了复杂仿真系统顶层建模描述语言向 DAG 图的自动转换方法,通过自动化分析仿真模型中的计算与通讯开销得到仿真任务并行度,从而实现复杂仿真问题的成员级自动化并行。

### (5) 参数化、组件化仿真模型库/函数库技术

丰富的模型库/函数库是复杂系统高效能仿真语言的重要组成部分。建立面向各领域、各层次参数化、组件化、通用化的仿真实体与其环境的模型库/函数库研究已成为仿真建模技术的研究热点。国外的产品如 Qualnet、Modelica 等仿真软件中的模型库/函数库。本团队重点研究仿真模型库/函数库的高效化技术,已研究实现了适用于高效能计算环境的“对抗仿真系统参数化/组件化模型库”。

## 2. 复杂系统高效能仿真算法

复杂系统高效能仿真算法的研究内容主要包括三级并行方法设计,包括:1) 设计大规模仿真问题的作业级并行方法,包括根据样本特征进行并行划分的方法以及优化系统并行仿真算法,例如本团队研究提出的 QMAEA 量子多智能进化算法、ADCPQG 自调节双链量子二级并行遗传算法、文化遗传算法以及 CS-DE 融合杜鹃搜索的多种群并行差分进化算法;2) 设计仿真系统内成员间任务级并行方法,包括基于功能划分和数据通信的配置规则设计、基于优化调度和拓扑结构的配置算法设计以及配置算法并行化设计。本团队研究成果主要包括:基于 RTI 的任务级并行方法(见后节“高效能仿真软件支撑技术”)以及基于事件表的任务级并行方法(基于乐观方法的并行算法);3) 设计基于复杂模型解算的线程级并行方法,包括线程级划分规则以及线程级分解与执行,如本团队研究提出的基于右函数负载均衡 SMPS 的连续系统常微分方程组并行算法,以及 GA - BHTR;基于 Transitive Reduction 和二叉堆维护的 GA 算法。

高效仿真算法进一步研究的焦点是围绕提高并行仿真算法的效率,保持仿真算法的可伸缩性,实现动态负载平衡,减少并行计算中协同所需的通信量,同时兼顾可扩展、可移植的大粒度任务级并行和在每个进程中组织便于发挥单机性能的合理数据结构、程序设计和通信方式。

## (二) 高效能仿真系统及支撑技术方面

### 1. 高效能仿真系统体系结构

本团队研究提出的高效能仿真系统体系结构主要由硬件系统层、并行操作系统层、并行编译系统层、仿真服务层和仿真门户层组成,而相关的标准、规范、协议和安全机制贯穿所有层次。其主要特点包括:高端仿真与云仿真一体化体系结构;数学、人在回路、硬件在回路一体化集成体系结构。如图 3 所示。

上述高效能仿真系统体系结构是一种网络化、智能化、服务化的一体化仿真支撑平台体系结构,其硬件系统包括基于多 CPU/多 GPU 的模块化计算节点、基于 GPU/FPGA/DSP 的专用加速部件、硬件在回路的仿真实接口设备、基于 GPU 的高速可视化子系统以及高速通信、协同、I/O,如图 4 所示。软件系统能够支持实时仿真的并行操作系统,提供支持“高端”和“云仿真”二类用户的各类仿真服务以及面向问题、用户友好的仿真语言系统,并且有丰富的支持并行运行的模型库、仿真算法库为底层支撑。

### 2. 高效能仿真硬件实现技术

目前,高效能仿真硬件正向以 FPGA、GPU 及定制专用加速部件、通用商品化多核/众核处理器为主导,通专结合、局部定制、针对性优化的高效节能方向发



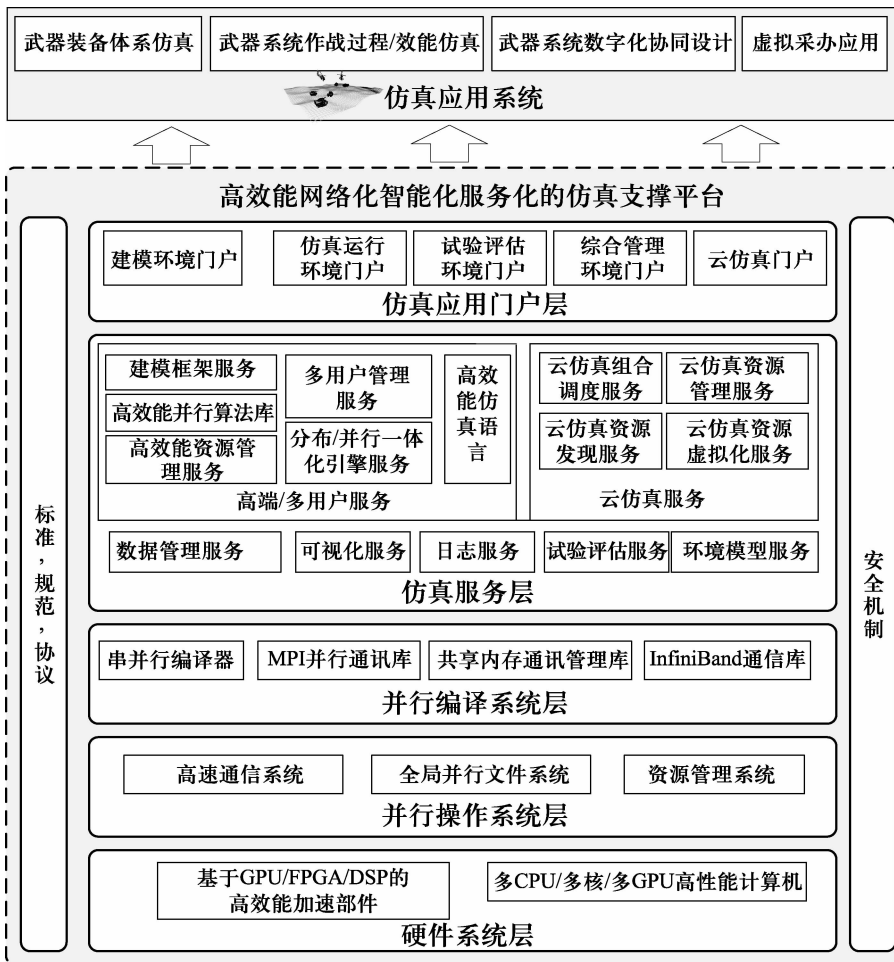


图 3 高效能仿真系统体系结构

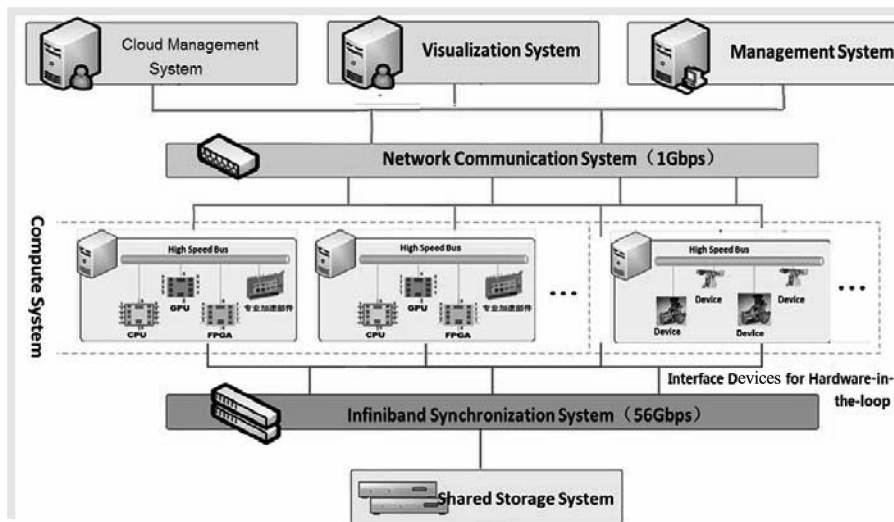


图 4 高效能仿真系统的硬件系统结构

展。高效能仿真硬件实现技术主要针对复杂系统仿真的特点和需求,在硬件方面进行针对性优化设计与实现,其主要研究内容包括:1) 基于 CPU + GPU 的异构高性能计算系统技术;2) 面向应用的高带宽、低延迟内部互连网络技术。本团队研究成果:Syscache 存储加速卡设备以及 Infiniband FDR 网络;3) 大容量、可伸缩的全局并行 I/O 系统技术。本团队研究成果:曙光并行存储系统 Parastor;4) 高性能芯片技术(多核/众核技术)。本团队研究成果:龙芯 3A 刀片服务系统。值得提出,江南计算所研制成功的我国第一款自主研发的 64 位通用 16 核处理器申威 1600 已成功地用于峰值千万亿次/秒的神威蓝光高性能计算机系统。

### 3. 高效能仿真软件支撑技术

高效能仿真软件支撑技术主要针对复杂系统仿真的特点和需求,在软件平台方面进行针对性设计;目前,高效能仿真软件向组件化,自动并行化方向发展。高效能仿真软件支撑技术的主要研究内容包括:1) 支持三级并行的并行操作系统技术。本团队研究成果包括:高速通信系统,成功开发 Infiniband 通讯协议,支持刀片服务器间的高效内部通信;全局并行文件系统 Parastor,在先进集群存储系统中应用开放体系架构;以及“Cloudview”云计算操作系统,提供 IP 管理、节点管理、进程管理、并行指令服务管理、时钟管理,以及虚拟化管理、项目管理、资源管理、资源状态监控等其他功能;2) 高效能并行化编译技术。本团队研究成果:UPCH 编译系统,成功应用于数据并行与 SIMD 编程;3) 仿真系统内成员间的任务级并行软件:高性能机上 RTI。本团队研究成果:基于共享内存的高性能机上 RTI,提高了实时性、可扩展性和吞吐量,适合于 SMP 服务器与多核机器;4) OpenMP/MPI 的实现技术;5) 高效能建模仿真语言技术(见前节“复杂系统高效能建模仿真语言”);6) 高性能并行算法库技术(见前节“复杂系统高效能仿真算法”);7) 高效能云仿真技术(见后节“高效能云仿真技术”)。

### 4. 高效能仿真可视化技术

本团队在高效能仿真可视化技术方面重点研究了基于 CPU + GPU 的并行计算框架的高效能可视化技术,如图 5 所示。基于 CPU + GPU 的并行可视化系统,根据任务分配和交互控制,进行场景的整体划分和分块描述,各分块场景交由多个 GPU 进行并行绘制,经图像合成后输出高分辨率图像。高效能仿真可视化技术的主要研究内容包括:1) 大规模虚拟场景的数据组织、调度技术;2) 基于多机、多核技术的两级并行绘制;3) 环境中不定形物高效可视化技术;4) 实时动态全局光照等。

### 5. 高效能“云仿真”技术

本团队基于仿真网格的研究成果,进一步融合虚拟化技术、普适计算技术和

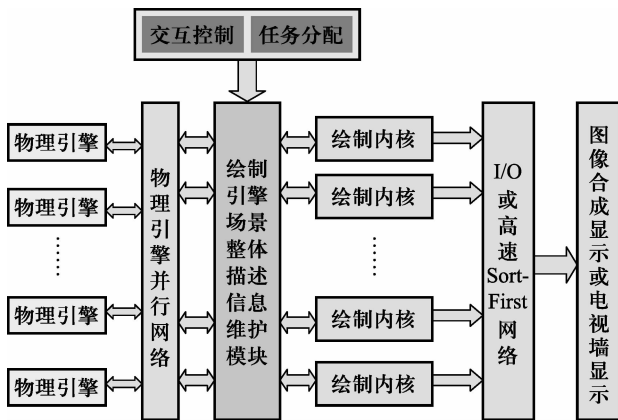


图5 基于GPU(群组)的并行可视化系统

高性能计算技术等,引入“云计算”理念,构建一种基于云计算理念的网络化建模与仿真系统——“云仿真系统”,以加强网络化建模与仿真平台的细粒度、各类资源(包括节点内的CPU核、存储器、软件等子资源)按需共享能力;充分支持多用户能力;协同能力;容错能力以及安全应用机制。

云仿真系统的关键技术体系如图6所示。本团队重点研究攻克的关键技术包括:1)异构高效能仿真资源和能力虚拟化技术。本团队研究成果:软件高效能虚拟化技术;异构、互操作、可重用仿真平台(如RTI)虚拟化技术;以及模型虚拟化技术;2)高效能虚拟化云仿真环境构建技术。本团队研究成果:根据仿真任务自动构建仿真虚拟化环境以及多用户仿真资源的优化调度;3)高性能RTI(见高效能仿真软件支撑技术);4)高效能虚拟化云仿真环境容错迁移技术。本团队研究成果:基于虚拟化技术的仿真资源容错迁移。

基于关键技术的研究成果,本团队研制开发了一个云仿真系统的原型CO-SIM - CSP,并已经在多学科虚拟样机协同仿真、大规模体系级协同仿真以及高性能仿真等领域开展了初步应用,验证了四种云仿真应用模式,包括个性化虚拟桌面模式、批作业模式、协同仿真模式以及能力交易模式。

云仿真技术的进一步研究内容包括:(1)进一步研究支持语义的各类仿真资源和能力的服务化统一描述模型和共享机制,以支持云仿真平台对各类仿真资源的统一管理和高效共享;(2)进一步研究仿真资源的高效虚拟化及其协同技术,以支持云仿真平台中虚拟化仿真资源的高效协同的仿真运行;(3)进一步研究面向海量用户的仿真资源和能力按需共享问题,支持云仿真平台按需提供给海量用户的建模与仿真能力;(4)进一步重视与加强高效云仿真系统的应用研究。

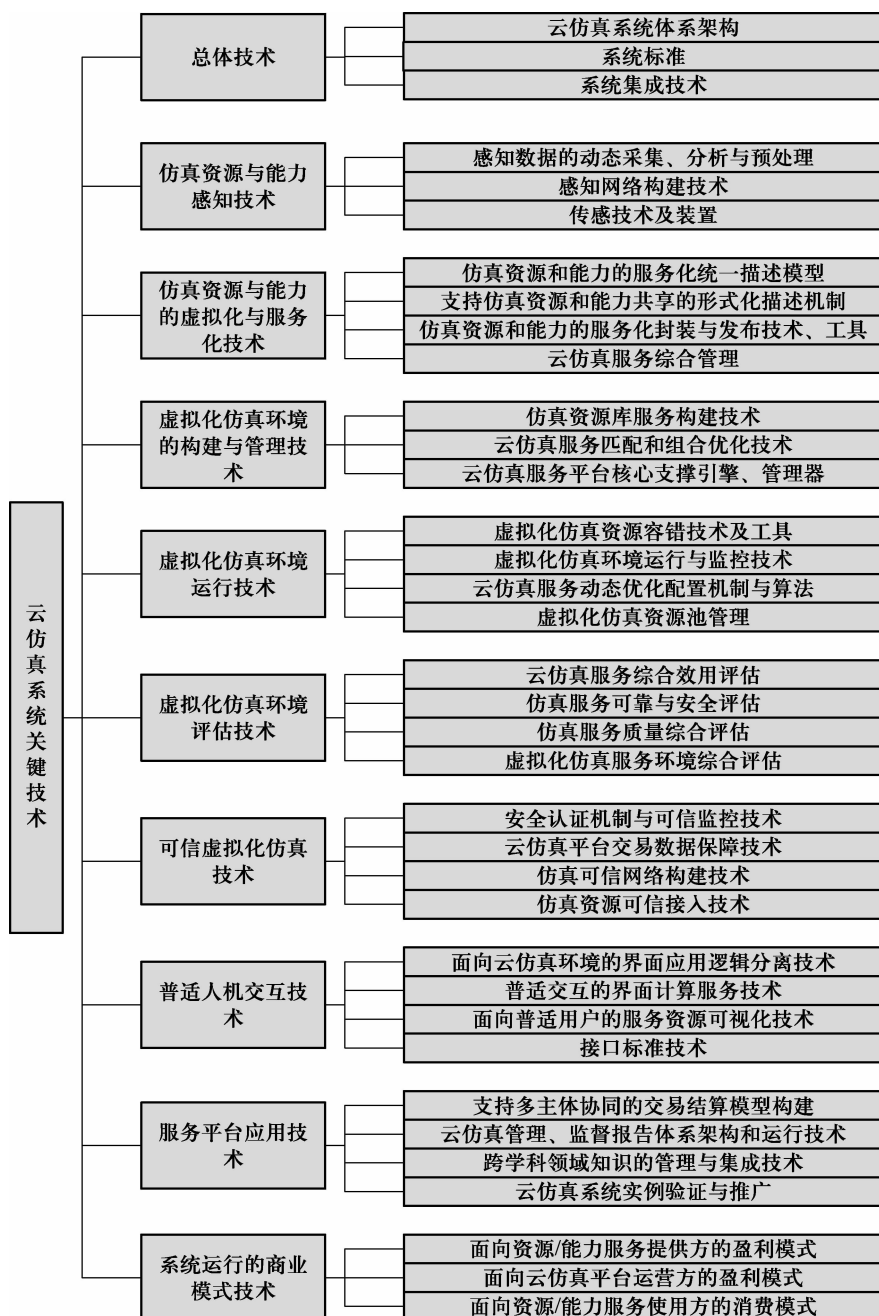


图 6 云仿真系统关键技术

### (三) 高效能仿真应用工程技术

#### 1. 复杂系统高效能仿真系统 VV&A 技术

仿真模型的 VV&A 技术主要包括了模型的校核、验证与验收。VV&A 过程

贯穿于建模与仿真的全生命周期,包括全生命周期 VV&A、全系统 VV&A、层次化 VV&A、全员 VV&A 以及管理全方位 VV&A。在国内,哈工大等单位开展了体系建模与仿真 VV&A 与可信度评估的研究工作,自主研发成功体系对抗仿真系统可信度评估的工具集,显著提高全生命周期内仿真系统的可信度。建模与仿真 VV&A 未来发展的趋势包括:(1) 深入的 VV&A 理论体系与框架;(2) 更加成熟的 VV&A 过程模型;(3) 更强化的 VV&A 全生命周期多阶段协作;(4) 严格客观的 VV&A 方法与自动化工具;(5) 更具指导性的 VV&A 标准。

## 2. 海量数据(大数据)处理技术

海量数据(大数据)处理技术主要针对 1) 数据量越来越大,数据备份的窗口将很难保证;2) 如何对海量数据进行挖掘和分析;以及 3) 海量数据如何快速恢复等问题,研究海量数据的存储、查询、分析与挖掘等技术。本团队目前主要针对并行挖掘技术以及分布式挖掘技术开展研究,实现仿真试验设计、试验数据采集、可视化分析处理以及智能化评估等一系列功能,为应用人员提供仿真结果分析与评估优化提供全面支持,如图 7 所示。海量数据(大数据)处理技术进一步的发展方向主要包括海量数据挖掘技术——基于编程模型的技术,以及流计算技术。

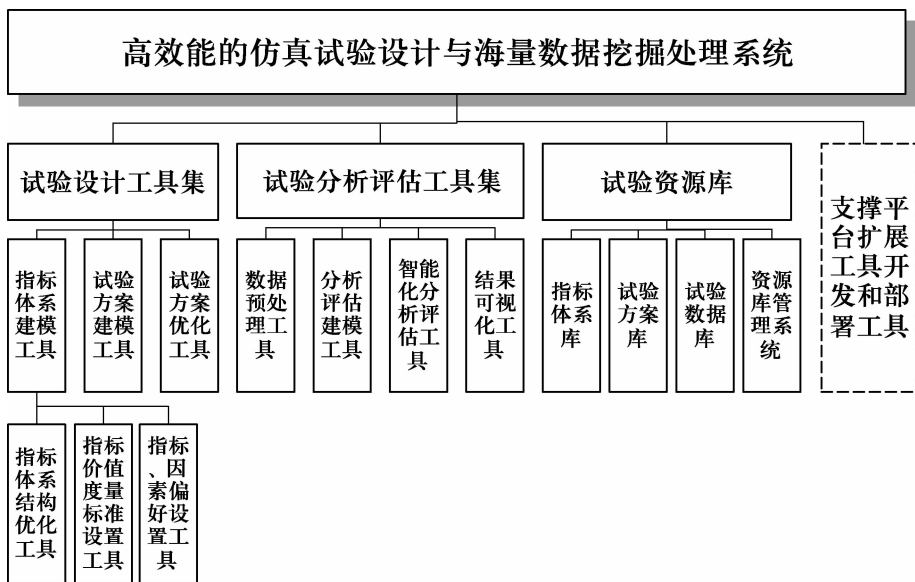


图 7 高效能的仿真试验设计与海量数据挖掘处理

## 3. 复杂系统仿真实验结果管理、分析与评估技术

复杂系统仿真实验及结果管理、分析与评估技术主要研究内容包括:仿真实验数据采集技术、仿真实验数据分析处理技术、仿真实验数据可视化技术、智能

化仿真评估技术以及 Benchmark 技术(含两类用户、三类仿真)等。以本团队研究的复杂系统仿真评估器为例,作为复杂系统仿真应用的有效评估工具,该仿真评估器提供了动态采集仿真数据,应用多种评估算法进行评估,以及仿真过程回放分析等功能,实现了复杂系统建模仿真工程实施中对原型系统的评估。未来复杂系统仿真实验及结果分析与评估技术值得关注的发展方向包括复杂系统灰色评估技术;多源异构信息智能化融合技术;基于信念图/知识网络的智能分析评估技术以及拟人学等。

#### 四、几点建议

1. 复杂系统高效能仿真技术是指融合高效能计算技术和现代建模与仿真技术,以优化复杂系统建模、仿真运行及结果分析等整体性能为目标的一类建模仿真技术。

2. 复杂系统高效能仿真技术是 21 世纪人类认识和改造世界的重要研究手段,是我国实现创新型国家战略目标的重要科学技术。

3. 提高复杂系统高效能仿真技术的作用,必须重视同时开展“被研究对象模型、高效能仿真系统、应用工程”等三个方面的理论、方法和技术的研究。

4. 本团队提出的面向两类用户、三类仿真的高效能仿真系统特点主要包括:

##### 1) 体系结构

- 高端仿真与云仿真一体化体系结构;
- 数学、人在回路、硬件在回路一体化集成体系结构(专用的高速 I/O 与通信子系统等)。

##### 2) 硬件系统

- 基于多 CPU/多 GPU 的模块化计算节点;
- 基于 GPU/FPGA/DSP 的专用加速部件;
- 基于 GPU 的高速可视化子系统;
- 高速通信、协同、I/O。

##### 3) 软件系统

- 支持实时仿真的并行操作系统;
- 提供支持“高端”和“云仿真”二类用户的各类仿真服务;
- 面向问题、用户友好的仿真语言系统。

##### 4) 算法与模型库

- 丰富的支持并行运行的高效组件化/参数化模型库;
- 三级并行复杂系统仿真算法库。

## 5) 应用技术

- 复杂系统全生命周期活动 VV&A 技术;
- 智能、分布式海量数据处理技术;
- Benchmark 设计技术(略)。



**李伯虎** 1961 年清华大学计算机专业毕业, 现任航天科工集团二院科技委常务副主任, 北京航空航天大学自动化学院名誉院长、中国系统仿真学会前任理事长。是我国计算机仿真与制造业信息化领域的专家, 先后荣获国家科技进步一等奖 1 项、二等奖 3 项及部级科技进步奖 14 项; 个人或合作发表论文 270 篇、书 12 本、译著 4 本。2012 年获国际建模与仿真学会颁发的“终身成就奖”。

2001 年当选为中国工程院院士。

# 两化融合战略中的仿真技术

肖田元

国家 CIMS 工程技术研究中心 清华大学信息学院

在中央的信息化与工业化融合的发展战略中,仿真技术在各个领域发挥了很大的作用,得到了越来越多的认同。怎样进一步推广应用仿真技术、发展仿真技术,我想从这两个方面来谈一点看法,不对的地方请大家批评指正。

我的发言分为 4 个部分,即(1) 仿真在两化融合中的作用,(2) 虚拟制造加速产品创新能力提升,(3) 虚拟制造加速产品创新案例,(4) 两化融合需要发展仿真技术。最后给出一个简短的结论。

## 一、仿真在两化融合中的作用

中国是世界上第二制造大国,“大而不强”是迫切需要解决的问题,两化融合的战略也是在这种情况下提出来的。在落实信息化与工业化融合发展的战略中,如何加速我国从制造大国走向制造强国的进程是一个大家关心的问题。制造业的竞争,归根到底取决于产品,产品强才有竞争能力。产品强就必须有创新能力。如何提高我们国家的创新能力,有很多的论述。这一次论坛重点从仿真技术的角度来讨论,仿真技术在我国制造业发展过程中已经得到很多应用。那么,在两化融合的发展战略中,应该如何推广应用仿真技术以加速提升我国制造业的创新能力呢?

这里,我想引用诺贝尔奖获得者哈默教授在他的一本著作中的一段话:“一个学生对爱因斯坦教授说,这些考题和去年是一样的。教授回答说,噢,是的,但其答案今年就不同了。”对于我们企业来说,“和去年一样”的考题是什么,就是创新能力。在不同的时代,要提升创新能力,会有不同的解决思路。

在两化融合中,如何认识和利用仿真技术来加速产品创新能力,这是我发言内容的第一点。多年来,仿真技术在制造业的许多点上已经得到了应用。但是,美国前国家科学基金会主任 Rita Colwell 说过,“过去通常认为科学包含理论和实验两方面,现在科学还包含第三方面的内容,即计算机仿真,并由计算机仿真将理论和实验两方面联接起来。”美国前能源部科学办公室主任 Raymond L. Orbach 也说过,“在 21 世纪的科学中,仿真和高端计算是理论和实验科学的平等伙



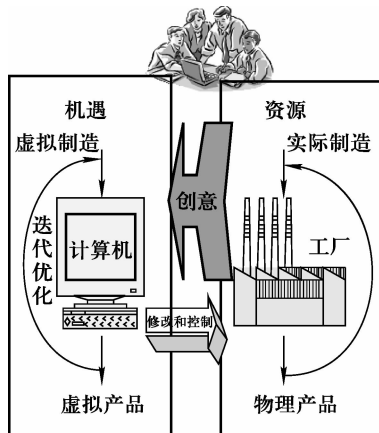


图1 传统制造与虚拟制造

伴”。“仿真是一种与实验和理论对等的方法论”。因此,可以说,仿真已经成为人类认识世界的第三种方法。在两化融合的时代,我认为,需要把仿真技术提到这样一种高度来认识。

实际上,我认为,仿真技术是信息化与工业化融合的典型技术,仿真不但要建模,而且要在计算机上实现、运行,这本身就是信息化的事情,同时,还要进行模型校验、确认,回到产品中去,即融合到工业化中。因此,信息化与工业化融合就应该大力推广应用仿真技术,全面系统地应用仿真技术。刚才刘永才院士的发言中介绍三院信息化时,把仿真融合到其中,也反映了这样一个思想。

创新能力,就是对客观世界的新认识、新发现的能力。作为信息时代认识世界的第三种方法,仿真可以也应该为加速产品创新能力的提升做出重要的贡献,同时也需要进一步发展仿真技术来适应两化融合的需求。

## 二、虚拟制造加速产品创新能力提升

我国企业信息化发展已经有 20 多年的历程,在产品设计开发方面,有 CAX、PDM、VM、CPC、PLM 等技术;在管理方面,有 MRP II、PCS、ERP、MES、SCM、CRM 等技术。这里,我想重点讨论虚拟制造(VM)。在两化融合阶段,虚拟制造成为人们关注的热点。特别是,在很多发达国家,虚拟制造从 90 年代开始已经得到广泛应用,已经成为产品全生命周期的核心技术,这并不奇怪。

虚拟制造的典型例子是波音 777 开发。新加坡是全世界第一个订购波音 777 的,但是在新加坡订购的时候,这个飞机还没有生产出来,那么新加坡为什么敢去订购?美国人敢卖?原因在于,整个波音 777 还没有生产的时候,整个虚拟样机及其制造过程已经在计算机上完成了。所有虚拟部件都进行了远距离实

时集成测试,采用虚拟加工单元模仿制造过程,包括 NC 机床刀位轨迹、铆接机翼的机器人运动轨迹等。飞行仿真器提供全天候飞行条件,实时接收数据,进行基于虚拟样机的飞行控制器测试,并交互式修改设计,最后对全部试飞工作进行了虚拟测试,而且可基于虚拟现实进行飞行训练。这样,未生产物理样机就获得订货,开发周期从过去 8 年缩短到 5 年。其它的典型例子也很多,如汽车行业,福特公司开发全数字化的轿车,节省花费 4200 万美元,制造阶段节省费用 10 亿美元,开发周期从 36 个月缩短到 18 个月,甚至 12 个月。奔驰公司,过去新车定型要进行 150 辆物理样车碰撞才能完成,现在只需要十分之一。

什么是虚拟制造?参考国内外文献,这里给出一个定义:虚拟制造是实际制造过程在计算机上的本质实现,即采用计算机仿真与虚拟现实技术,在计算机上群组协同工作,实现产品的设计、工艺规划、加工制造、性能分析、质量检验以及企业各级过程的管理与控制等产品制造的本质过程,以增强制造过程各级的决策与控制能力。

相对于传统的“制造”(国外文献称为“小制造(small manufacturing)”)的含义,“虚拟制造”是广义的制造,国外文献称为“大制造(big manufacturing)”。图 1 表示了两者的联系与区别。基于设计人员的创意,传统的实际制造是面向企业资源,以物理产品为目标,在制造过程中通过对物理样机的反复修改定型,周期长、成本高、更新换代困难。虚拟制造的目标是虚拟产品,在“制造”过程中是在计算机上对虚拟样机进行迭代优化,以得到最佳虚拟产品。同时,虚拟产品还用于对物理产品的修改和控制。虚拟制造不是 CAD、CAE、CAPP 技术的单点应用,而是信息时代仿真技术面向制造的综合集成应用,是一种通过产品模型仿真来模拟和预测产品功能、性能及可制造性等各方面可能存在的问题,使得产品开发走出主要依赖于经验的狭小天地,发展到全方位预测的新阶段。虚拟制造基于产品三维实体模型和环境模型,在计算机仿真环境下,通过三维动画和虚拟现实,沉浸到由模型创建的虚拟环境中,自由设置虚拟传感器直接观察仿真结果,并利用人本身的智能进行信息融合,从而定量地把握未来产品的品质,对产品进行构思、设计、制造、测试和分析,进而优化产品设计。

从应用的角度来看,虚拟制造可分为三类,即以设计为中心的虚拟制造、以生产为中心的虚拟制造以及以控制为中心的虚拟制造。

以设计为中心的虚拟制造是为设计者提供设计和评估产品的支撑环境,在产品设计与工艺设计过程阶段就引入下游的加工、装配、运行、维护等信息,在计算机上仿真多种“虚拟”原型,在设计阶段就可以对零部件直至整机进行各种性能分析,旨在利用仿真来优化产品设计。其局部目标是针对设计阶段的某个关注点(如产品结构、可加工性、可装配性等)进行仿真和评估,全局目标是对整个

产品的各方面性能进行仿真和评估,达到在实际产品开发出来之前就能了解“设计出来的产品将会是什么样”。目前,我国很多企业还处在两维到三维的过渡,主要是利用计算机实现产品表示、产品展示,也有局部利用仿真技术即 CAE 进行零部件的分析,但全面实现以设计为中心的虚拟制造还有较长的路程要走。

以生产为中心的虚拟制造的主要应用领域是工厂或工程的物理布局及生产计划的编排,以解决“这样组织生产是否合理”的问题。局部目标是针对生产中某些关注点(如生产计划)进行仿真;全局目标是对整个生产过程进行仿真,对各个生产计划进行评估。它将仿真技术加入到生产过程模型中,以此来方便和快捷地评价多种生产方案,检验新工艺流程的可信度、产品的生产效率、资源的需求状况,从而优化制造环境的配置和生产计划。主要支持技术包括离散事件系统(DEDS)仿真技术、嵌入式仿真技术等。

以控制为中心的虚拟制造是将仿真技术加入到控制模型和实际生产过程中,从而实现制造系统的组织、调度与控制策略的优化。

虚拟制造不但为现代制造提供超越人们已有的知识、经验来认识世界的技术手段,而且可实现产品的技术、知识的沉淀与积累,从而为持续提高创新能力提供有效支持。

### 三、虚拟制造加速产品创新案例

下面,我想通过两个实际的例子来说明,如何通过虚拟制造来提升中国企业的创新能力。

目前,我国大多数企业的产品都经历从引进到仿制这样一个过程。从国外引进先进产品作为原型,采用逆向工程,对其进行测绘、分析、消化,再根据我国市场的情况进行变型设计。然而,随着产品的技术含量增加,国外企业从保护知识产权出发,产品的核心技术很难掌握,因此,变型设计的产品难以与国外的产品竞争。

90年代末,中国的纺织机械产品设备、工艺落后,纺织产品竞争能力逐年下降,造成原材料、能源等资源大量浪费。中央经济工作会议决定把纺织工业确定为国有企业改革和解困的突破口,进行产品结构调整。根据国际市场的需求,纺机产品结构调整任务是从主导的有梭织机调整到无梭织机,国内无此产品。某企业花了120万元进口了国外设备,按照传统的逆向工程做法,对该产品进行仿制,未能成功。这是一种无梭、高速、全自动化新型产品,五大运动系统(引纬、打纬、卷取、送经、开口)协调动作。后来该企业与清华大学合作,采用了虚拟制造技术,对五大运动系统进行了全面机理分析,找到并解决了关键技术,6个月生产了真正具有自主知识产权的产品,质量达到了同类产品的国际水平,其振动噪

声还低于当时国际同类最先进的产品,对我国纺机行业的技术进步和产业结构优化升级产生了重大作用,迫使国外该产品从 120 万元降到 60 万元。后来该企业又在此基础上花了 1 年时间,形成了具有国际竞争力的第 2 代产品。这个例子说明,虚拟制造技术可以为逆向工程提供强有力的支持,可以帮助消化核心技术,掌握机理,进行真正的自主变型设计,从而获得具有自主知识产权的产品,达到产品创新。

两化融合下产品特征是信息技术与工业技术融合,从而产品就更为复杂了。复杂产品的虚拟制造需要多学科协同仿真技术的支持,以实现集成创新。例如,高速动车是典型的复杂产品,我国高速动车大多是国外设计的,由我国相关企业制造。企业提出“引进→消化→硬化→优化”的发展战略。如何才能落实这一战略?特别是,所设计的产品对我国的轨道、气候的适应程度如何?安全性、舒适性能否保障?在 863 计划的支持下,我们开发出协同设计、仿真、优化一体化平台,基于设计的三维模型,实现 8 节车体及其悬挂系统一系、二系的弹簧、阻尼器、钩缓等进行多种工况下的协同仿真,分析舒适性指标、曲线通过性能、安全性指标(包括脱轨系数、减载率、轮轨横向力、轮轴横向力、倾覆系数)等;进行了动车组过曲线仿真,以弯道运行考察曲线通过半径、安全速度、脱轨系数、减载率、轮轴横向力等;还以转向架弹簧刚度、阻尼器阻尼系数为设计变量,以临界速度、舒适度为优化目标、安全性指标为约束函数,对悬挂系统进行协同优化,实现了悬挂系统优化设计等。在研制 400 公里/时高速检测列车动车组时,利用协同仿真平台,实现不同仿真工具(如 ABAQUS、ADAMS、VAMPIRE、MATLAB 等)的分布集成与协同仿真,实现各种动力学仿真软件的结果数据输出和分析,实现高速检测列车在多种路谱工况下的列车性能分析,为高速检测列车开发提供技术分析手段。该技术还在地铁车等产品开发中得到了广泛应用,提升了产品开发能力和产品技术水平,缩短了产品开发周期,取得了良好的经济效益。

我们的实践表明,中国的制造企业经过 20 余年的信息化后,许多企业可以而且应该广泛而深入地应用虚拟制造技术,以加速形成具有自主知识产权的高附加值的产品,从而加速从“制造大国”到“制造强国”的转变。

#### 四、两化融合需要发展仿真技术

信息化与工业化融合基本特征是 3I,即物联化(Instrumented,透彻感知);互联化(Interconnected,互联互通);智能化(Intelligent,自动化)。3I 的支撑技术是 3C 融合,即通信(Communication)、计算(Computation)与控制(Control)。通信不仅是互联网通信,还要考虑无线网、移动网、卫星网;计算不仅是一般编程计算,还要考虑嵌入式计算、并行计算、虚拟计算;控制不仅是单机控制,而且要充分考

虑分布人机交互与动态实时控制的结合。

随着工业化和信息化的融合发展,3C 融合产生一类新型系统,即 CPS(Cyber Physical System),值得关注。CPS 是计算网络和物理环境融合的多维复杂系统,通过 3C 的有机融合与深度协作,实现大型工程系统的实时感知、控制和信息服务。CPS 将让整个世界互联起来,如同互联网改变了人与人的互动一样,CPS 将会改变我们与物理世界(包括人)的互动。计算机和网络实现功能扩展的物理设备无处不在,并将推动工业产品和技术的升级换代。人们认为,CPS 不仅会催生出新的工业,甚至会重新排列现有产业布局。

2007 年,美国总统科学技术顾问委员会在《挑战下的领先—竞争世界中的信息技术研发》的报告中列出了 8 个大关键的信息技术,CPS 位列首位,美国自然科学基金确定将 CPS 作为未来 15 年最优先资助(top priority)的领域。在欧洲,CPS 的术语是整体工程(Ensemble Engineering),并作为未来 15~20 年的主要研究方向,计划从 2007 年到 2013 年在 ARTMEIS 上投入 54 亿欧元(超过 70 亿美元)。

CPS 的产生会对仿真技术的发展产生什么影响呢?在所有的有关 CPS 的报告当中,几乎都认为 CPS 的建模与仿真技术是其研究与开发的关键,这是值得我们仿真科技工作者关注的。CPS 将计算过程、通讯过程和物理过程融合起来,连续过程与离散事件交织,规模大小、时空跨度各异,系统通信和交互方式多变,系统高度自动、自治、协调,规模可变,系统结构具有联邦式、分布式、开放型、可重构性等。这些特点,无疑对仿真技术的发展产生深刻影响,需要发展新的仿真技术以支持 CPS 的发展,包括

(1) 多面向建模:CPS 物理部件具有带资源约束的信息处理能力。系统或物理部件中嵌入了软件,计算过程与物理过程深度集成,且计算能力与网络带宽通常有限,不同部件一般有不同时空粒度,严格地受到空间与实时能力的约束。

(2) 支持可伸缩性:一个 CPS 的传感器和致动器可能少则几十个,多则几千个,而且这些实体之间是松耦合的,可以自由地加入与退出系统,框架应能提供相应的通信机制,保证在不同规模的情况下均能高效正确地进行仿真,而性能不会有太多的影响。

(3) 支持可移动性:具有对移动性进行建模的能力(例如通信方式、位置变化引起信号强度的变化等)。

(4) 混合式仿真:CPS 通常是异构的,既包含有连续系统,也包含有离散事件系统,而且两者必须协同,因此仿真框架不但能支持 DEDS 仿真与 CVDS 仿真,而且易于支持两者应用逻辑同步仿真。

(5) 全局参考时间: CPS 通常由多种异构的系统组成, 因此要提供异构应用逻辑的并发仿真能力, 这就要求按时间进行全局事件排序以及部分事件排序, 全局参考时间是不可缺少的。

(6) 基于开放性标准的集成: 标准的开放性至关重要, 包括协议、基础设施与开发平台, 这样才能保证现有环境可易于集成到该框架中。

目前, 已有的框架有些采用将现有的仿真工具进行紧密集成的模式。典型的有, 将物理系统的仿真工具加以扩展从而也可以仿真离散事件和网络, 例如基于 Simulink 的原版 TrueTime、基于 Modelica 的较新版 TrueTime, 以及 Ptolemy 的扩展 VisualSense; 将成熟的网络仿真工具与成熟的物理系统仿真工具结合起来, 例如 ADEVS 与 ns-2 集成、Simulink 与 ns-2 集成、Modelica 与 ns-2 集成, 以及 Agent/Plant 及其后续版本等。

另一种技术路线是在 HLA 标准上继续发展。有两种做法, 一种是在继承原有 HLA 标准的基础上, 进行改进。例如, IEEE 推出新的 HLA evolved 标准, 对 IEEE 1516 的多方面进行了扩展, 包括将 FOM 模块化, 增加容错机制、以及改进部分接口规范等。另一种是抛开原有的 HLA 标准, 建立新的更加完善的标准, 典型的是 XMSF。主要是将建模与仿真的适用范围扩展到互联网以及基于 MDA 建模。另外, 还有 Steinman 等综合以往技术, 提出普适的标准仿真体系结构 (Standard Simulation Architecture, SSA)。

所有这些进展, 均难以充分满足 CPS 仿真根本特征的需求。因此, 可以说 CPS 建模与仿真对仿真技术提出了新的挑战。今天, 听了李伯虎院士关于“复杂系统高效能建模仿真技术”的发言, 期望李院士的高效能仿真平台能够较好地支持 CPS 仿真的需求。

最后, 我就我的发言做一个简短的小结:

在两化融合发展战略中, 产品创新是我国制造业重要的发展战略, 虚拟制造是一种能有效支持产品创新的先进仿真技术, 可为加速我国从制造大国到制造强国的转变提供有力的技术支持。CPS 将推动工业产品和技术的升级换代, 甚至会重新排列现有产业布局, CPS 的建模与仿真技术是其研究与开发的关键支撑技术, 也是仿真技术研究的热点和重要的发展方向, 值得关注。



**肖田元** 1970年毕业于清华大学,现任国家CIMS工程技术研究中心常务副主任,清华大学信息学院学术委员会副主任委员。中国系统仿真学会常务副理事长,中国自动化学会荣誉理事、系统仿真专业委员会主任委员。主要研究方向:虚拟制造与系统仿真、CIMS与网络化制造。发表论文200余篇,出版著作11部,获得省部级科技进步奖11项,其中国家科技进步二等奖1项,三等奖2项,部级一等

奖3项。

# 虚拟现实技术在工业中的应用

赵沁平

虚拟现实技术与系统国家重点实验室  
(北京航空航天大学)

虚拟现实是以计算机技术为核心,结合相关科学技术,生成与一定范围真实环境在视、听、触感等方面高度近似的数字化环境,用户借助必要的装备与数字化环境中的对象进行交互作用、相互影响,可以产生亲临相应真实环境的感受和体验。

下面从两个方面说明虚拟现实的作用。一是对计算机系统发展的贡献。信息化社会运行活动的基础是数据的活动,数据活动主要包括三个方面,即数据传输,包括通讯;数据处理,包括计算;还有数据运用,如数据的表现、虚拟现实、多媒体、控制等。数据活动的核心引擎就是计算机系统。作为计算机科技工作者,有三大永恒的目标,就是如何使计算机系统更高效、更聪明和更友好。虚拟现实作为人机一体的数据运用系统,可以直接对第三个目标:人机友好和谐做出巨大贡献,同时间接地对第一、二个目标产生重要的推动作用。二是从应用的角度。任何一项科学技术都有其适用的范围和作用,虚拟现实作为一门学科高度交叉的应用性科学技术,是计算机系统与各应用领域的接口,可以为各行业的规划决策、设计评价和训练体验等提供新的平台和手段。可以说虚拟现实对各应用领域的作用,类似于数学对于物理学的作用。

在规划决策方面的应用,如新建设施或作业方案的规划、演示、体验、评估、决策,如城市规划、评估;军事战役战术的规划、演练与决策;医疗手术方案的设计、预演、评价等。在设计评价方面的应用,如设备、产品的设计、虚拟组装、虚拟样机的性能功能测试与沉浸式体验等。在训练演练方面的应用,如各种危险环境(如核设施)、作业对象难以获得(如医疗手术、航天器维修),以及耗资巨大(如军事演练)的行业领域的业务训练和演练。

虚拟现实是一种技术,也是一种方法或技术路线。由于其重要性,越来越受到一些发达国家的重视。美国工程院公布了经评选产生的 21 世纪人类在工程技术领域所面临的 14 个重大挑战性问题(Grand Challenges for Engineering),其



其中之一是“提升虚拟现实的逼真性和应用性(Enhance virtual reality)”。英国政府于2006年12月,发布了针对2015~2020年的8个新兴科学技术集群的战略报告,其中6个直接含有模拟、建模、仿真、虚拟的内容。日本政府2007年5月发布了“创新2025”长期战略报告,描绘了2025年日本创新愿景,有18个方向,“虚拟现实”是其中之一。我国政府2006年2月颁布的“国家中长期科学和技术发展规划纲要”把“虚拟现实技术”作为信息领域优先支持的三个前沿技术之一。

目前,国内一些行业对虚拟现实的需求越来越多,特别是军事、航空航天、装备制造、城市规划、医学、教育、文化、娱乐等领域。

视频1显示的是我们给某军区开发的指挥模拟训练系统;视频2是我们研制的六自由度全任务飞行模拟器;视频3是我们开发的北京奥运会开幕式节目创意仿真示例;视频4是我们开发的60周年国庆阅兵方案规划决策系统;视频5是一个虚拟手术训练平台。



奥运会开幕式节目仿真



模拟训练系统



国庆阅兵方案推演

下面重点讲虚拟现实技术在工业中的应用,包括:虚拟设计、虚拟样机、虚拟维护、过程模拟、逆向分析和企业及生产的可视化管理。

虚拟现实技术给工业信息技术带来了如下几方面的变化:一是从数值仿真扩展到图形仿真,二是从CAD扩展到虚拟样机与沉浸式设计体验,三是生产加工过程的自动控制扩展到生产加工过程的可视化模拟、预测。

虚拟设计与感知评价:一些公司,如:沃尔沃、福特、通用、克莱斯勒等汽车公司,英国、法国的宇航公司、波音公司等,将虚拟现实技术用于产品设计,包括外观、组件布局、产品组装、生产流程、用户体验等。充分体现了多方面的优点:多人协同,设计人员可在不同的时间、地点协同参与设计;沉浸感,可在沉浸的虚拟环境中完成设计,感知设计结果;交互性,可将工厂的各种生产信息关联在一起。例如波音777在设计、装配、性能评价,特别是管线布局与测试中采用虚拟现实技术,缩短研发周期50%,降低设计研发成本约60%。

北航与中国商飞等合作,研制了虚实融合的飞机驾驶舱仪表布局评估系统。设计人员和用户能在初期体验、评估设计结果,及早发现问题。评估内容包括仪

表布置合理性、信息显示及颜色匹配的适人性、驾驶舱内饰与光学环境的适人性(见下图)。这是驾驶舱仪表布局评估系统视频(见视频6)和飞行过程评估(视频7)。



虚实融合驾驶舱

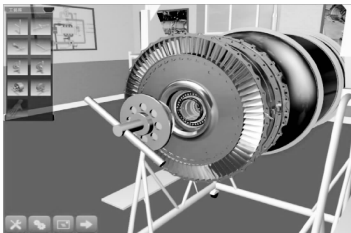
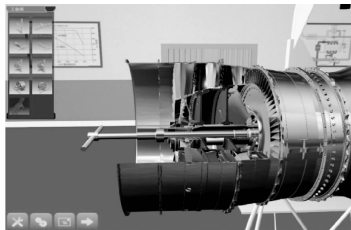


虚拟仪表显示内容

**虚拟样机:**虚拟样机是近似于实物样机的数字化仿真样机。虚拟样机为“设计-测试-评估”提供了新的手段。不必构造物理样机,设计者通过操作和分析虚拟样机,测试和评估产品设计的合理性,找到设计问题并改善最终产品的可用性,节省成本和时间。

**虚拟拆装维护:**使用虚拟维护技术培训维护人员,特别是危险环境下的设备维护训练,可以避免不必要的设备损坏和降低风险,节约大量成本。在对复杂装备维护过程中,增强现实技术可以指导维护人员更好地进行维护。如飞机、汽车重要部位的装配、拆卸与维修。

下图是北航开发的虚拟维护工具和虚实融合的航空发动机拆装系统。

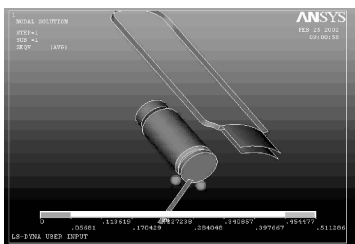


虚实融合

这是北航虚实融合的发动机拆装过程(见视频8)。

**过程模拟:**北航的枪弹过程模拟(见视频9)。

**逆向分析:**通过对系统运行结果数据的可视动态分析,推断设计中存在的问题。这是一个反复的过程,也有个北航的示例(见视频10)。



子弹抛壳过程模拟



整枪抗跌落强度性能模拟

企业及生产的可视化管理:这是北航开发的山西大运高速公路可视化信息管理系统。

最后谈一下个人对虚拟现实技术在工业中应用的体会。根据我们多年从事虚拟现实在工业中应用的经验,有如下几个必须重视解决的问题:

- 明确现代工业的应用需求
- 各类数据的获取
- 物理与行为建模
- 模型的可信性
- 传感器网络
- 人机交互机制与交互设备
- 与 CAD 系统的结合
- 工业应用效果的评价



**赵沁平** 1975年毕业于太原理工大学,现任虚拟现实技术与系统国家重点实验室(北京航空航天大学)主任、中国系统仿真学会理事长。是我国虚拟现实技术领域的专家。发表学术论文160余篇,出版专著3部;获国家科技进步一等奖1项、二等奖2项、省部级科技奖8项。

# 协同仿真 - 智能专家系统 技术研究与应用

钟山

中国航天科工集团

**摘要:**本文阐述了在军事高新技术迅速发展的背景下,建设协同仿真 - 智能专家系统的重要性和必要性,研究提出了平台的体系结构,应用模式,介绍了平台核心服务层相关关键技术的初步研究成果、平台实现和应用验证实例,最后阐述了对平台建设的工作展望。

**关键词:**协同仿真;智能专家

## 一、引言

军事高新技术的智能化发展已成为必然趋势,是军事现代化的重要标志之一。它对 21 世纪的武器装备、作战模式乃至战略战术都将产生重大而深刻的影响。人工智能是与生物工程和空间技术齐名的当今世界三大尖端技术之一,是 50 年代以来由计算机科学、控制论、信息论、神经生理学、心理学等多门学科相互渗透、发展,以模仿人类行为和思考的一门新学科。实践表明,利用人工智能技术,可以大大地提高武器装备研制、生产、使用与维护的效率。武器装备数字化、自动化、智能化,是现代武器装备作战效能的倍增器。

新一代武器系统由于其复杂性及尖端性,其研制具有下述特点:涉及的专业学科技术广、配套的研制单位多、知识含量高、新技术多学科交叉多、研制周期(一般八年至十几年)和使用周期(一般十五年至几十年)长等。其研制过程已构成一个复杂的系统工程,迫切需要提供一套基于知识工程的先进设计方法支持复杂产品研制,迫切需要提供一套基于知识工程的设计提供理论方法基础,形成相关技术平台、标准规范和应用模式支持理论成果的应用。需要针对目前研制过程中主要基于传统经验的设计,解决多领域设计知识的积累、总结、沉淀不够,共享和重用率低的问题。研究协同仿真 - 智能专家系统技术,解决制约复杂产品基于知识工程先进设计的一系列共性、基础性问题,开发以“一网、四

库、两个引擎”为支撑的骨架型专家系统支持实际工程的应用,形成相关标准规范和应用模式,能够系统地支持该项目研究成果的推广应用,从而满足军工复杂装备系统和民用产业的应用需求。

## 二、阶段研究成果

1977年第五届国际人工智能联合会议上,美国斯坦福大学计算机系教授费哥巴姆(Feigenbaum)作了关于“人工智能的艺术”(The Art of Artificial Intelligence)的讲演,提出“知识工程”这一概念,并指出“知识工程是应用人工智能的原理与方法,对那些需要专家知识才能解决的应用难题提供求解的手段”。知识工程本质上是“知识处理”工程。因此,知识的获取、知识的表示和知识的运用构成了知识工程的三大要素。知识工程是伴随专家系统的研究而产生的。

协同仿真-智能专家系统,简称“平台”,是一个以“知识工程”为核心,综合应用人工智能与计算智能原理与方法、现代设计理论与方法、先进建模与仿真技术,以及高新技术装备应用领域相关专业技术的复杂装备系统智能化开发与应用的平台。包括一网:一个面向智能专家系统的知识构件服务网格;四库:数据库/模型库/知识库/算法库;和二引擎:推理引擎、仿真引擎。以解决新一代高新技术装备和工程全生命周期对基于知识的智能化工程技术的迫切需求,继承和重用已有的装备研制经验,建立基于知识工程的先进设计技术体系,提高武器装备方案论证与总体设计水平。

### (一) 体系结构

协同仿真-智能专家系统在实现上分为支撑层、服务层和应用层(包括应用工具层和应用层)三个层次,如图1所示。在支撑层,具有支撑多学科协同设计与试验专家系统实现所需的各类数据、知识、算法和模型资源,以及对这些资源的维护和管理功能。在服务层,采用知识构件服务网格对分布式资源进行管理,提供基于知识工程的智能专家系统核心服务,即基于知识的定性推理服务和基于模型的定量仿真分析服务;同时提供知识获取工具提供可视化的操作界面,方便用户进行专家知识建模;高层建模工具提供可视化的操作界面,方便用户进行系统建模,封装了推理引擎,用户可以摆脱底层代码方便调用;运行管理器和运行支撑系统封装了仿真引擎,支持系统模型的运行;故障监控器显示在线运行推理结果,支持动态调试,如图2所示。在应用层,基于核心服务提供基于知识工程的复杂产品研制应用工具集,支持工程研制的各个应用环节。

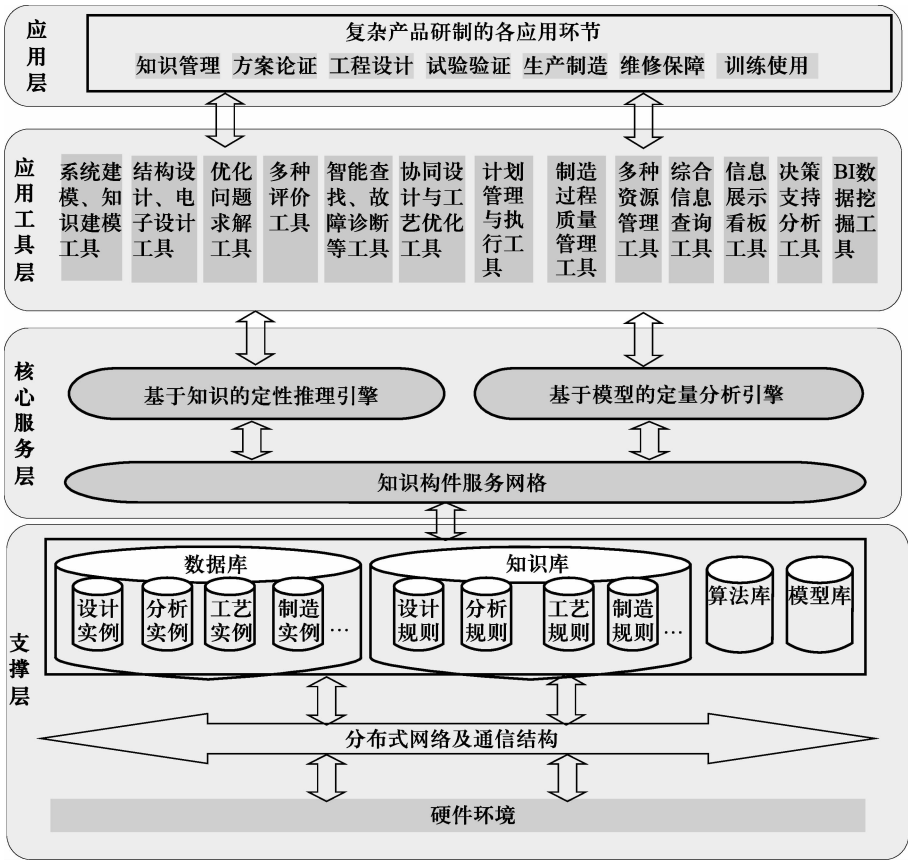


图1 协同仿真-智能专家系统体系结构

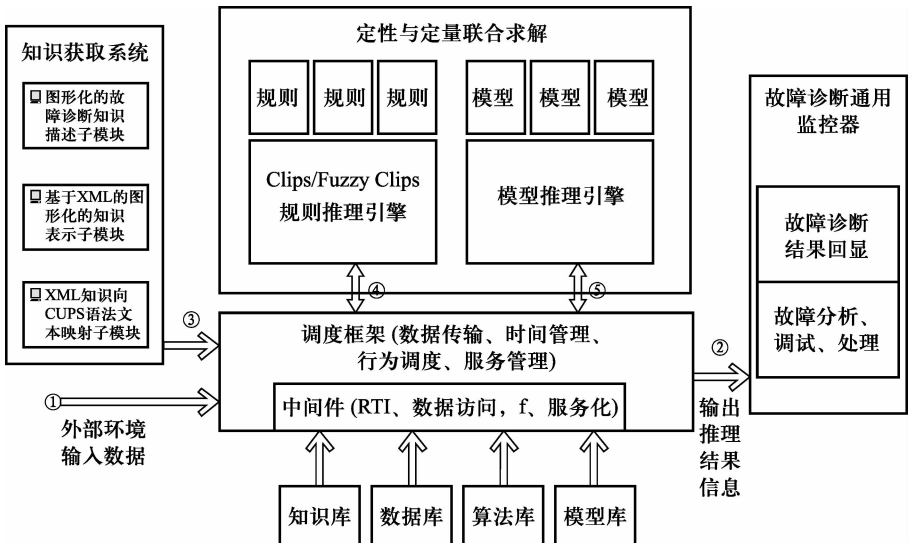


图2 核心服务层结构及信息流示意图

## (二) 应用模式

协同仿真 - 智能专家系统支持三大类应用模式,包括实时在线模式:用于实时分析从现场和仿真系统采集的高速数据,进行实时故障诊断和事前预测;离线模式:用于对现场获得的数据或现象进行事后处理、评估或诊断;人机交互模式:用于以对话的方式在平台运行过程中获取用户知识,增加分析结果的有效性。

## 三、突破关键技术

### (一) 知识获取技术

复杂产品具有涉及学科专业广、跨学科协同、多专业耦合等特点,使专家知识具有不确定性、动态性、正向成功知识为主的特点。知识获取技术研究专家知识形式化表达、描述、管理及集成应用技术,解决专家知识的获取、表达、组织、共享、检索、运用以及学习更新问题;研究建立图形化的知识描述子模块,提供较为完善的知识及规则描述模板及语法,用于知识工程师对自然语言描述的专家领域知识及经验数据进行抽象化的规范描述,并进一步转换为图形化的规则描述,如因因果导向图,从而实现由知识源到知识脚本的非自动获取,如图 3 所示。

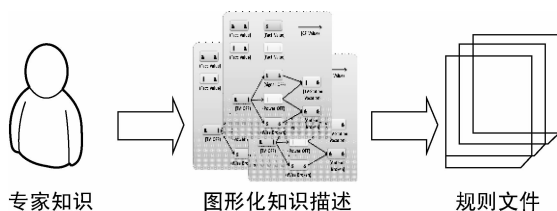


图 3 专家领域知识到图形化知识描述转化过程示意

因果导向图是一种发现问题“根本原因”的方法,它是将导致故障发生的各种原因进行归纳、分析,用简明的文字和线条罗列故障的原因,并将众多的原因分类、分层并进行分析的过程。该模型能更有效地模拟客观世界,得到更加准确的推理结论。同时,因果图模型也是可能性传播图模型和故障影响传播图模型的基础,具有重要的工业应用价值,如在线故障诊断等。同时针对专家知识具有模糊性的特点,研究提出了专家知识的模糊表达应用的基本步骤。

### (二) 不确定知识推理技术

基于产生式规则推理,结合计算智能推理应用,实现不确定知识推理。采用 FuzzyClips 基于产生式规则的推理机实现推理过程,通过研究和应用,总结技术

优势为采用高效的 Rete 匹配算法、可靠的推理控制策略、支持不确定性推理和模糊推理。应用 DS 证据理论通过对不确定信息的置信度进行段内和段间的加权推理(采用不同的权重函数),成功地融合出每段内和整个试验过程的状态和概率。也可研究和实现 Bayes 故障树推理机,在应用中,试验过程的评估采用“从前向后”的推理评定,一旦出现异常或失控,利用故障树“从后向前”的推理过程来定位故障。

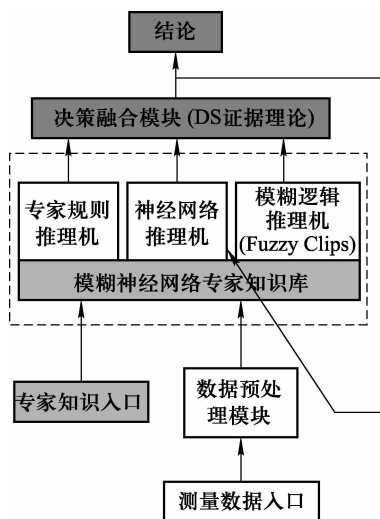


图4 智能化推理框架

### (三) 仿真引擎与推理引擎集成技术

仿真引擎是一种模型集成环境,动态载入不同仿真任务相关的仿真模型后,形成相应的仿真应用系统。包含三个部分:连接管理、调度管理和组件内部的一个事件列表。连接管理实现多学科仿真模型之间的数据信息和控制信息的交互;调度管理和事件列表分别应用状态机理论和时间管理共同实现仿真模型行为的调度。仿真引擎在行为调度和时间管理上具有层次性和混合性等特点,实现了基于组件构造复杂系统时,其逻辑结构和逻辑行为与软件实现时的组件及其通讯和运行控制的有效分离和自动映射,建立一种非编译的复杂系统基于组件构造模式和方法。

推理引擎实现对知识加载、对推理算法及其决策融合算法的调度与推理。能够根据事件的类型、特征等,选择相应的专家规则推理机、神经网络推理机、模糊逻辑推理机、数据挖掘算法等,或综合应用多个推理机及其融合算法,快捷准确地提供预报、诊断和评估结果。



在已有多学科虚拟样机协同仿真平台/工具集 (Cosim) 的基础上,实现仿真引擎与推理引擎的集成是建设协同仿真 - 智能专家系统的关键。集成结构主要包含三部分: EED 文件解析模块、Clips 推理引擎、Cosim 端口注册模块。三者的关系为: Clips 推理引擎通过 EED 文件解析、获取和生成端口信息,利用这些端口信息,通过 Cosim 端口注册向 Cosim 仿真引擎告知其所具备的端口。

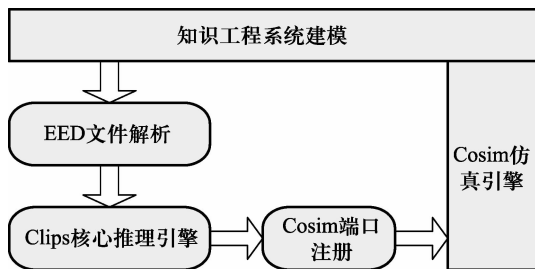


图 5 仿真引擎与推理引擎集成结构图

(1) EED 文件解析:该模块要实现从 Cosim 专家系统高层建模生成的 EED 文件中解析出在仿真运行中要调用推理引擎所需要的端口,同时将解析出的端口信息返回给 Clips 核心组件。

(2) Clips 核心组件:该模块通过将 Clips 源代码嵌入到 Cosim 元素中,该 Cosim 元素是经过改造的 Cosim 元素,具有动态生成端口的特点。将 Clips 源代码嵌入后,该元素具有了 Clips 的推理功能,并能够响应 Cosim 的数据、事件输入,并给出输出结果。将 Clips 封装成通用的 Cosim 元素是集成的关键。

(3) Cosim 端口注册:从 EED 文件的解析信息得到端口的信息情况,为了与 Cosim 仿真引擎进行事件、数据交互,需要动态生成相应的端口,生成端口后还要通过该模块将这些端口注册给仿真引擎,这样仿真引擎才知道推理引擎哪些端口是可以被调用的。

推理引擎的调用流程如图 6 所示:

(1) 在仿真开始时进行引擎加载,此时,EED 文件解析读取,解析高层建模生成的 EED 文件,并将解析出的端口向仿真引擎注册。

(2) 在仿真运行时,在每一步的仿真时刻,仿真引擎将推理的语句或数据通过端口传给推理引擎,推理引擎进行语法解析,并进行一系列的推理运算,获得推理结果后将结果传回仿真引擎,仿真引擎获得结果后继续进行后续的调用。

#### (四) 面向服务的知识网格技术

在协同仿真 - 智能专家系统体系结构研究中,其核心服务层包含面向服务的知识网格,主要是针对复杂产品设计与试验应用中涉及的专业学科技术广,配

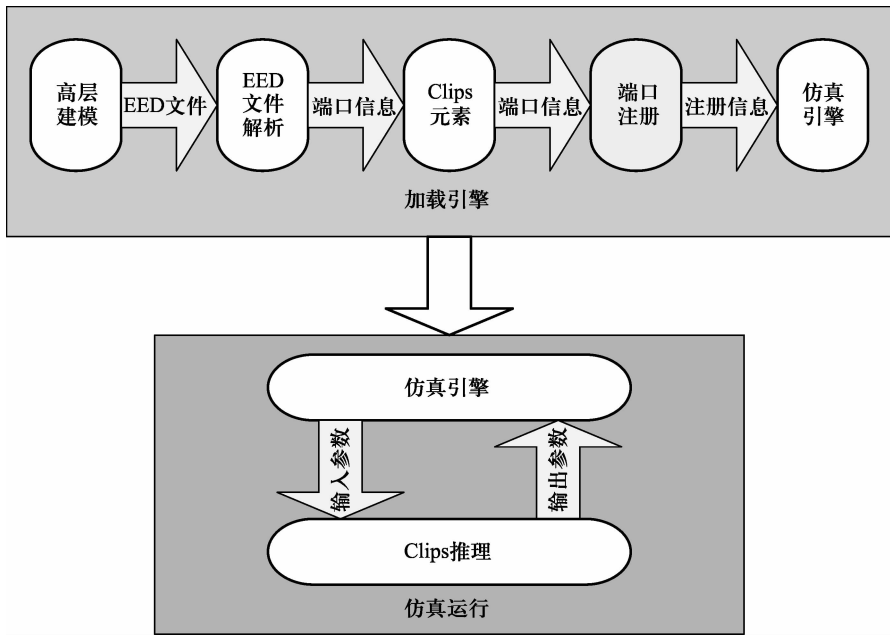


图6 推理引擎调用流程图

套的研制单位分布各地的特点,存在知识如何有效管理和应用的问题,提出利用面向服务的知识网格技术来解决这一问题。

面向服务的知识网格介于资源层与面向复杂产品设计应用的核心服务之间,旨在综合应用知识构件的服务化、多领域知识的智能化发现和分布异地多领域知识的管理等技术,提供一个面向服务的分布式知识网格系统,支持各类异地知识资源的管理和协同应用。

面向服务的知识网格支持底层资源层的各类模型、知识、算法、数据资源、设计工具软件资源和设计科学仪器资源的服务化,并提供管理机制;同时根据上层对资源的应用需求,提供包括知识的发现、索引、组合、实例等服务,为用户进行复杂产品设计活动提供浏览器和桌面形式的门户/工具,包括面向工程研制的协同可视化门户和知识网格通用门户,为核心服务层的基于知识的定性推理和基于模型的定量仿真分析提供各类资源的动态集成和协同应用。

## 四、平台实现及应用

### (一) 平台实现

以关键技术为基础,开发实现了协同仿真-智能专家系统/工具集 V1.0 版本,包括三大类核心工具。交互式知识获取工具的开发支持带模糊的面向故障

诊断的因果导向图知识描述、因果导向图与 FZClips 的转换与映射和图形化知识建模。系统建模工具支持图形化建模、推理引擎和仿真引擎集成。通用的故障监控器支持故障诊断过程和结果监视、推理过程回显和应用系统的单步调试,工具部分界面如图 7 所示:

## (二) 应用验证

协同仿真 - 智能专家系统支持离线和在线两种模式的预测、诊断、评估、改进(PDEM)等应用,即:

(1) 预测(P):离在线预测,并确定系统在运行的过程中预先分析如规划、计划、预报、预测、训练、仿真等。在应用中将基于蒙特卡洛方法开展的大量仿真与专家知识应用结合起来,通过专家知识实现对结果的有效预测。

(2) 诊断(D):确定故障的种类、发生的原因、程度大小以及发生的时间,如故障、修复、纠错、检测、服务、诊断、维护等。

通过专家知识的采集、故障树的建立和推理机的实现,根据专家经验、中间事件的概率,确定优化的 FTA 搜索路径,进行故障诊断。建立某控制面板故障树→故障树推理,根据专家知识选择故障特征→得到推理诊断结果和概率→根据推理结果查看维修措施和指导意见。

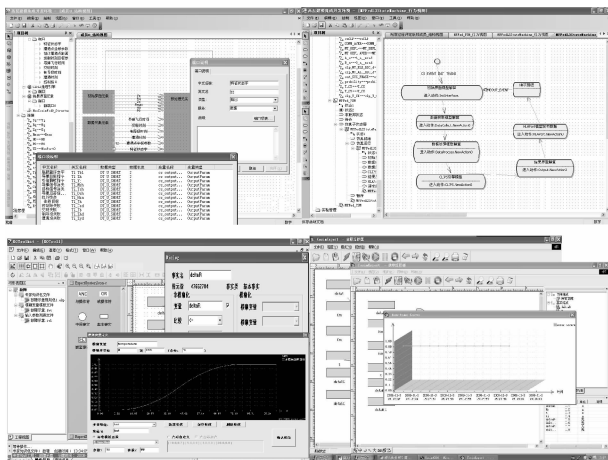


图 7 协同仿真 - 智能专家系统/工具集界面

(3) 评估:离在线判断事件对系统的影响和影响的发展趋势,针对不同情况采取不同措施,让用户对事件进行科学有效的处理,如验证、应对、决策、鉴定、确认、评估等。

例如某飞行试验采用“分区、分段、分态”的方法,应用 FZClips 和 DS 证据理



图 8 雷达故障诊断系统

论对不确定信息进行推理和信息融合,对整个飞行试验和各个阶段给出评估结论。分区:A,B,C,D 四区。分段:初制导、交班、制导、遭遇、拦截。分态:正常、异常、失控。

针对制导过程的特点,需要对制导过程的全过程各个阶段进行评估。传统的方法重视制导过程的结果,缺乏对过程的关注;如果制导过程结果成功,则忽略了过程中可能由设计缺陷所引起的异常。如果制导过程结果失败,则需要人工查阅大量的试验数据,找到异常发生的时刻和阶段,进而进行故障诊断。本系统解决了传统方法对过程的忽略,实时采集试验数据,利用专家知识在线推理,给出各个阶段过程中的评定结果和概率,并提供状态回放功能,方便试验人员及时把握制导过程状态和便于查找问题。该系统通过实时在线处理的应用模式,对制导过程中初制导段、初制导交班、制导段、遭遇段和遭遇点给出评定结果和概率,取得了良好的应用效果,如图 9 所示。

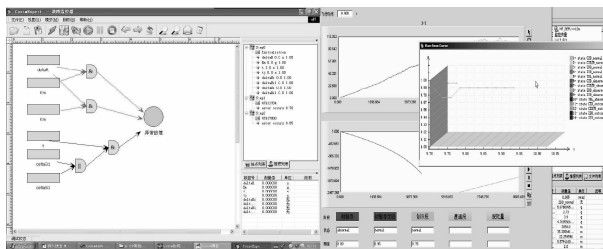


图 9 制导过程评定系统应用效果

(4) 改进:针对系统(事件)的评估或诊断结果,通过专家知识分析,让用户获得系统(事件)的改进提高,如分析、改善、学习、重构、提升、改进、设计等。

在实际研制中,某系统虽然试验成功,但分析得出在某阶段的控制中,有许

多步是异常的(控制不很理想),这引起了控制领域专家的关注,评估异常或失控是“小概率事件”还是“设计缺陷”,对由设计缺陷所引起的异常或失控必须进行改进。同时也可在试验前,综合运用仿真技术和人工智能技术,以专家知识推理结果为依据,对仿真模型进行改进。

## 五、展 望

初步实践表明,协同仿真 - 智能专家系统为复杂产品智能化设计和试验提供了一个有效的手段,能够提供具有实时在线处理、离线分析和人机交互 3 种工作模式,解决系统(事件)过程中预测、诊断、评估、改进等四大类应用问题。能够通过积累有工程实践经验的装备研制领域专家知识,实施人才战略,培养年轻的设计师队伍;通过实现对多领域专家知识的高效获取、有机融合、有效管理和综合应用,以提高各类工程设计资源和工程设计知识的积累、总结、提炼、共享、重用及智能化应用水平。

鉴于协同仿真 - 智能专家系统对复杂产品设计和试验的作用,该系统的建设是一项长期和持续的工作,下一阶段我们的主要工作是:

(1) 结合复杂产品研制的特点和应用需求,继续深入研究平台的相关关键技术,包括多模式智能化推理与融合算法;多领域知识获取与融合技术;多领域知识统一建模与联合求解技术;知识构件服务网格等关键技术;

(2) 以关键技术研究为基础,进一步完善支持复杂产品设计和试验智能化系统开发的平台/工具集;

(3) 以平台为依托,研究智能化设计和试验应用技术,拓展平台在复杂产品工程研制中的应用阶段和应用领域;同时以应用为牵引,研究建立智能化设计和试验系统相关的标准规范。



**钟山** 1957年毕业于哈尔滨军事工程学院,现任中国航天科工集团科技委顾问,是我国制导控制领域的专家,在防空导弹武器系统研制中,先后两次荣获国家科技进步特等奖;编写各种技术报告百余篇;为国防事业做出突出贡献。兼任上海交大等多所大学博士生导师,空军科技发展和人才建设顾问。1999年当选为中国工程院院士。



# 第四部分

## 附 录

---





# 附录1 部分参会人员名单

## 中国工程院第138场工程科技 论坛参会专家及工作人员

序号	姓名	性别	工作单位	职务/职称
1.	潘云鹤	男	中国工程院	中国工程院常务副院长/院士
2.	王子才	男	哈尔滨工业大学	工程科技论坛负责人/院士
3.	包为民	男	中国航天科技集团公司	院士
4.	黄培康	男	中国航天科工集团公司二院	院士
5.	李伯虎	男	中国航天科工集团公司二院	中国系统仿真学会 前任理事长/院士
6.	刘永才	男	中国航天科工集团公司三院	院士
7.	于本水	男	中国航天科工集团公司二院	院士
8.	钟山	男	中国航天科工集团公司二院	院士
9.	李仁涵	男	中国工程院三局	副局长
10.	高战军	男	中国工程院三局信息与电子工程学 部办公室	处长
11.	刘静	女	中国工程院三局学术与出版办公室	处长
12.	王成俊	男	中国工程院	院办副主任
13.	范桂梅	女	中国工程院三局信息与电子工程学 部办公室	主任科员
14.	洪俞	男	中国工程院三局信息与电子工程学 部办公室	
15.	赵沁平	男	北京航空航天大学	中国系统仿真学会 现任理事长/教授

续表

序号	姓名	性别	工作单位	职务/职称
16.	肖田元	男	清华大学	中国系统仿真学会 常务副理事长/教授
17.	陈宗基	男	北京航空航天大学	中国系统仿真学会 荣誉副理事长/教授
18.	李幼平	男	桂林航天工业学院	党委书记/教授
19.	张昌年	男	桂林航天工业学院	校长/教授
20.	旷永青	男	桂林航天工业学院	党委副书记/教授
21.	郝德温	男	桂林航天工业学院	副校长/教授
22.	罗国湘	男	桂林航天工业学院	副校长/教授
23.	詹皖生	男	桂林航天工业学院	副校长/副教授
24.	崔黎	男	桂林航天电子有限公司(165厂)	副总工程师兼主任/研究员
25.	付梦印	男	北京理工大学	院长
26.	黄梅娟	女	西安电子科技大学	科长
27.	刘昕戈	男	北京理工大学	副院长
28.	宋建平	男	中国航天科工集团八〇一厂	副总师/高级工程师
29.	赵东旭	男	《中国工程科学》杂志社	编辑
30.	侯萍梅	女	中国航天科工集团公司二院	研究员
31.	张平	女	中国系统仿真学会	副秘书长
32.	刘诗璇	女	中国系统仿真学会	副秘书长
33.	赵罡	男	中国系统仿真学会	
34.	何红雨	男	桂林航天工业学院教务处	处长/教授
35.	黄金盛	男	桂林航天工业学院党委组织部	部长/副教授
36.	刘孝民	男	桂林航天工业学院科研处	处长/教授
37.	李燕	女	桂林航天工业学院信息工程系	主任/教授
38.	张一纯	男	桂林航天工业学院党办、校办	副主任/教授
39.	谢雄辉	男	桂林航天工业学院学生工作处	副处长

## 附录2 媒体报道

### “航天工程与仿真技术”工程 科技论坛召开

由中国工程院主办,中国工程院信息与电子工程学部、中国系统仿真学会及桂林航天工业学院共同承办,“航天工程与仿真技术论坛”于2012年5月29日在桂林香格里拉大酒店隆重召开。

本次“航天工程与仿真技术论坛”是中国工程院第138场工程科技论坛。航天已经成为一个对国家安全、科技进步、经济和社会发展具有重要意义的行业。同时,它也需要高投入,面临高风险。因此,科学的、系统的仿真实理论和仿真方法是航天工程重要的发展基础与动力。仿真技术在我国航天工程的应用中发展迅速,并发挥了重要作用。除航天之外,仿真技术在我国航空、制造、土木工程、灾害防治等领域都有重要应用并取得了很大的成绩。

本次论坛以“未来20年航天工程与仿真技术的机遇与挑战”为主题,深入分析了我国航天事业大发展对仿真技术的巨大需求,探讨了航天工程与仿真技术面临的重大机遇和主要挑战以及应对挑战的主要对策;研讨了未来20年航天工程与仿真技术发展的总体框架、主要方向以及与相关学科技术领域的互动关系。

工程院常务副院长潘云鹤院士出席了论坛并致开幕词,王子才院士主持开幕式,8位院士以及专家出席了此次论坛。参加论坛的人数达230余人。

于本水院士主持了上午的论坛,包为民、王子才、李伯虎院士分别作了“对航天器仿真技术发展的思考”、“半实物仿真技术”、“复杂系统高效能建模仿真技术初步研究”的学术报告。

下午的论坛由李伯虎院士主持,刘永才、黄培康、钟山院士及肖田元、赵沁平教授分别作了“航天型号系统工程信息化与仿真”、“航天系统工程中目标、环境和传感器的建模与仿真”、“基于知识工程的协同仿真与专家系统”、“两化融合战略中仿真技术”、“虚拟现实在工业中的应用”的学术报告。

院士及专家们的报告得到与会代表的热烈反应,纷纷对报告内容进行提问、咨询,报告人分别进行了认真解答。论坛上,与会代表畅所欲言,气氛热烈,发言踊跃。

论坛研讨深入广泛,提高了航天工程与仿真技术发展的共识,探讨了航天工程与仿真技术的发展思路,进一步加强和扩大了航天工程与仿真技术的学术交流,为中国航天和仿真技术的发展提出了科学的建议。此次论坛的召开,必将对促进中国未来 20 年航天工程与仿真技术的发展产生重要而积极的影响。

# 后 记

科学技术是第一生产力。纵观历史,人类文明的每一次进步都是由重大科学发现和技术革命所引领和支撑的。进入 21 世纪,科学技术日益成为经济社会发展的主要驱动力。我们国家的发展必须以科学发展为主题,以加快转变经济发展方式为主线。而实现科学发展、加快转变经济发展方式,最根本的是要依靠科技的力量,最关键的是要大幅提高自主创新能力。党的十八大报告特别强调,科技创新是提高社会生产力和综合国力的重要支撑,必须摆在国家发展全局的核心位置,提出了实施“创新驱动发展战略”。

面对未来发展之重任,中国工程院将进一步加强国家工程科技思想库的建设,充分发挥院士和优秀专家的集体智慧,以前瞻性、战略性、宏观性思维开展学术交流与研讨,为国家战略决策提供科学思想和系统方案,以科学咨询支持科学决策,以科学决策引领科学发展。

工程院历来重视对前沿热点问题的研究及其与工程实践应用的结合。自 2000 年元月,中国工程院创办了中国工程科技论坛,旨在搭建学术性交流平台,组织院士专家就工程科技领域的热点、难点、重点问题聚而论道。十年来,中国工程科技论坛以灵活多样的组织形式、和谐宽松的学术氛围,打造了一个百花齐放、百家争鸣的学术交流平台,在活跃学术思想、引领学科发展、服务科学决策等方面发挥着积极作用。

至 2011 年,中国工程科技论坛经过百余场的淬炼,已成为中国工程院乃至中国工程科技界的品牌学术活动。中国工程院学术与出版委员会今后将论坛有关报告汇编成书陆续出版,愿以此为实现美丽中国的永续发展贡献出自己的力量。

中国工程院

## 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