



张霖 北京航空航天大学教授。曾任国际建模仿真学会(SCS)主席，中国仿真学会常务副理事长，北京航空航天大学自动化学院副院长等，现为亚洲仿真联盟主席，中国工业合作协会仿真技术产业分会会长，SCS Fellow，中国仿真学会会士，国家863主题项目和国家重点研发项目首席专家，复杂产品先进制造系统教育部工程研究中心主任，复杂产品智能制造系统技术国家重点实验室学术委员会委员，航天系统国家级仿真重点实验室学术委员会委员，全球高被引科学家。曾获国家863十五周年先进个人和全国优秀科技工作者称号，2021年获国际建模仿真学会(SCS)杰出成就奖。研究方向：智能制造系统，复杂系统建模仿真，云制造，模型工程等。

## 基于建模仿真的体系工程

张霖<sup>1,2</sup>, 王昆玉<sup>1,2</sup>, 赖李媛君<sup>1,2</sup>, 任磊<sup>1,2</sup>

(1. 北京航空航天大学, 北京 100191; 2. 复杂产品先进制造系统教育部工程研究中心, 北京 100191)

**摘要：**通过军事、社会、制造等领域中的典型案例，介绍了复杂工程体系的概念和特点以及建模仿真对研究复杂工程体系的意义，以复杂产品制造为例，梳理了从系统工程到基于模型的系统工程(MBSE)，再到基于建模仿真的体系工程(MSBS2E)的演变过程，分析了复杂工程体系建模仿真的特点和挑战，介绍了模型理论与方法、计算方法与平台以及不确定性问题等几个MSBS2E的研究热点。

**关键词：**复杂工程体系；建模仿真；基于模型的系统工程；体系工程

中图分类号：TP 391.9 文献标志码：A 文章编号：1004-731X(2022)02-0179-12

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.21-0579

## Modeling & Simulation based System of Systems Engineering

Zhang Lin<sup>1,2</sup>, Wang Kunyu<sup>1,2</sup>, Laili Yuanjun<sup>1,2</sup>, Ren Lei<sup>1,2</sup>

(1. Beihang University, Beijing, 100191, China;

2. Engineering Research Center of Complex Product Advanced Manufacturing System, Ministry of Education, Beijing, 100191, China)

**Abstract:** Through the typical cases in the field of military, society, manufacturing etc., this paper introduces the concept and features of complex engineering system of systems as well as the significance of modeling and simulation for the study of complex engineering system of systems. Taking complex product manufacturing as an example, the evolution process from systems engineering to model-based systems engineering (MBSE) and then to modeling and simulation-based system of systems engineering is analyzed. The characteristics and challenges of modeling and simulation of complex engineering system of systems is discussed. Some research topics in filed of MSBS2E is introduced, which includes model theory and methods, computing methods and platforms and uncertainty problems.

**Keywords:** complex engineering system of systems; modeling & simulation; model-based system engineering(MBSE); system of systems engineering

## 引言

随着社会和科学技术的发展，人类认知的边界也在不断扩张，当前一些引领社会发展的新概念和新

收稿日期：2021-06-22 修回日期：2021-07-02

基金项目：国家重点研发项目(2018YFB1701600)

第一作者：张霖(1966-)，男，博士，教授，研究方向为复杂系统建模仿真、云制造、模型工程、智能制造等。E-mail: johnlin9999@163.com

趋势被广泛讨论和研究，例如：智能电网、智慧城市、智能制造、群体智能、网络化协同作战等。这些研究对象有一些共性特征，其结构组成复杂、系统规模庞大，因此阻碍了人们对其内在机理和行为特性的深入研究。而在自然界，会发现也存在许多类似的大规模复杂系统，例如：鱼群、蜂群、鸟群等，这些由大量单个个体组成的复杂系统会根据环境的变换表现出不同的行为特性，例如鱼群可以根据迁徙、觅食或者防御等不同目的表现出不同的鱼群形状，从而产生鱼群效应，通过组织协作达到了单个个体所不能实现的功能。类似于这样的复杂系统，或者说组合系统，通常被称为体系。体系往往是由多个组件系统构成，每一个组件系统都具备独立的功能，从组件系统的关系上来看，各个组件系统之间松耦合，相对自主，位置分散，它们互相协作、演化，使得整个体系对外表现出涌现行为特点。工程是指人类利用科学技术改造客观世界、创造新事物的过程<sup>[1]</sup>，由多个工程系统所构成的复杂工程系统称之为工程体系。工程体系遍布在国防、经济、制造、信息、社会等多个领域，随着科技的进步，不断成为人们研究关注的焦点。

**军事对抗体系：**现代国防军事体系由海、陆、空等多兵种系统甚至多国部队系统构成，每个构成系统又由不同的组织架构和武器装备构成，针对这样大规模异构的复杂军事对抗体系，想要形成一体化的作战体系，往往涉及多维度、多层次、多领域的组织和协同，如何有效组织协调各方力量，快速响应完成指定作战任务，是现代军事对抗体系需要深入探索的难题<sup>[2]</sup>；

**城市医疗体系：**现代大城市医疗体系由不同层级的医疗服务单元组成，小到自助医疗设备、私人医生、诊所，大到社区医院、政府医院、联邦医院，研究如何规划城市医疗体系架构，高效协调医疗资源，优化市民诊疗路径，方便医疗健康信息获取和管理，最大程度上实现城市医疗体系的高效率协作是当前迫切需求的<sup>[3]</sup>；

**城市基础设施体系：**现代城市规模逐渐扩张、体量逐渐庞大，社会经济系统、交通系统<sup>[4]</sup>、能源系统、环境系统等共同构成了城市基础设施复杂体系，各个系统之间相互关联耦合，互为因果，使得整个城市表现出一些涌现性的行为特性，如何对复杂城市系统基础设施体系进行有效管理和规划，也是目前困扰人们的难题，例如：面对老旧的城市基础设施(电缆、管道等)，如何协调各个城市子系统从全局开展城市改造工作，保证尽量少的影响城市正常功能运作等。

**复杂企业体系：**现代企业规模日益庞大，由业务部门、人力部门、财务部门、生产部门等多个部门构成，产品从需求分析、设计、制造、生产、测试、销售等全生命周期研发过程需要各个部门的沟通协调，目前每个部门有每个部门独立的管理系统和数据规范，各部门数据接口不一致，导致各部门之间数据难以融合共享，信息难以有效流通，不利于整个企业层面的管理和运营。针对企业体系，如何构建层次清晰、严格规范的体系结构，促进多学科、多层次、多视角的数据融合、信息共享，进而高效管理和协调企业的运作，是目前企业转型升级的关键问题；

**复杂产品制造体系：**复杂产品指研发成本高、技术难度大、规模大、集成程度高的产品、系统或者设施，例如：航天器、船舶、大型制造装备等。复杂产品的制造往往涉及多个学科领域，由多个研究部门、生产部门、管理部门的技术人员协作完成，覆盖了复杂产品从需求分析、设计论证、生产加工、组装、测试、交付、维护等全生命周期，贯穿从零件、部件、组件、设备、子系统到系统的全系统组成，因此，复杂产品制造过程本身就是一个复杂体系，如何实现复杂产品研制自顶向下的任务分解以及自底向上的系统集成，高效管理和协调各个部门，保证产品按时可靠交付，一直以来都是人们努力探索和研究的方向。

以上所述的几类复杂工程体系结构复杂，包含内生的和外生的强不确定性、非线性，且具有长生命周

期、不断演化和涌现性等特点。这使得人们难以运用经典的系统理论来分析复杂工程体系,或者说在现实世界中研究复杂工程体系十分困难,往往需要耗费大量的人力、时间、财力等,甚至在有些情况下,由于条件限制而无法开展研究。而建模仿真手段作为人类认识客观世界的一种新的途径,为人们认知复杂工程体系提供了有力的手段<sup>[5-6]</sup>。通过将现实世界中的实体映射到虚拟空间,形成对应的数字化模型,利用强大的计算资源和高效算法,可以模拟物理实体的真实特性。借助于建模仿真技术,人们可以在虚拟空间反复推演论证复杂工程体系的内在机理,支持多视角、多粒度、多分辨率、多领域分析体系模型的特性,可以模拟现实世界中难以达到或实现的极端条件来分析体系行为,对于复杂产品制造体系来说,建模仿真技术可以帮助人们提前发现问题,支持问题回溯,提前验证复杂产品性能,有助于复杂产品制造一次成功。总之,建模仿真技术为人们分析各类复杂工程体系开辟了有效途径,在某些情形下甚至是唯一途径<sup>[5]</sup>。

## 1 系统工程、基于模型的系统工程和基于建模仿真的体系工程

以复杂产品研制为例,简要概括从系统工程到基于模型的系统工程,再到基于建模仿真的体系工程的发展脉络。

长期以来,复杂产品研制遵循传统的系统工程研发模式,图1为典型的系统工程V型模型,左侧为系统设计阶段,包括需求分析与规格定义、系统功能与架构设计、子系统设计等,自顶向下,根据需求将任务实现分解,下发到不同部门,每个部门之间信息传递通过书写文档、数据等实现。由于每个部门有每个部门内部单独的文档书写习惯、数据表达格式,再加上学科领域不同还可能具有不同的术语和公式,这些问题造成部门之间信息传递效率降低,不同部门的设计人员、工程人员阅读技术文档费时费力,而且极有可能引发二义性等问题,使得整个系统设计过程中协同效率大大降低,出现问题的风险大大提高。同时,由于复杂产品本身的复杂特性,使得文档数量剧增,给后期技术管理和文档检索造成了极大不便,最主要的,这种方式导致技术经验难以积累,不利于相关技术方案的重用。V型开发模式的右侧为实物样机自底向上的集成,包括零部件、组件、设备、子系统到全系统的集成,集成完毕之后再进行一系列的技术测试。这种实物样机的测试方式虽然最真实有效,但存在很多弊端,首先,复杂产品往往造价不菲,测试过程中如果出现重大问题导致产品报废,将造成难以接受的损失;其次,等到实物集成阶段才发现设计方案存在的问题,会大大加大问题解决的成本和周期;最后,实物与设计方案以及责任单位之间没有规范严格的映射关系,出现问题不利于追查定位与回溯。

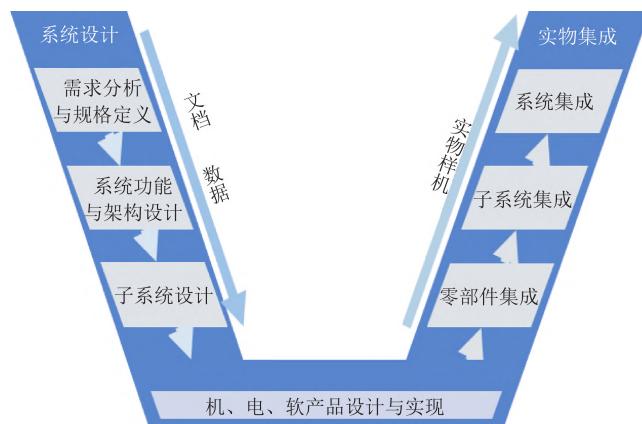


图1 复杂产品传统系统工程研发模式  
Fig. 1 Traditional system engineering development mode for complex products

由于传统的系统工程存在管理与技术上的弊端,使其越来越不适应复杂工程体系的开发研制。为了进一步发展和完善系统工程方法,业界提出了以模型驱动的系统开发方法。比较有代表性的是在软件工程领域,利用统一建模语言UML,为软件开发设计过程提供统一的、严格的、规范的图形化描述,有效地避免了信息传递过程中的二义性,而且可以以利于不同领域工程人员理解的方式描述各组件系统之间的关联关系和接口规范。在以模型驱动的开发方式思想的基础上,2007年,INCOSE在《系统工程2020年愿景》中,提出了基于模型的系统工程(model-based system engineering, MBSE),MBSE是建模方法的形式化应用,以支持系统从概念设计阶段开始一直持续到开发阶段和后续生命期阶段的需求、设计、分析、验证和确认活动<sup>[7]</sup>(见图2)。MBSE以模型驱动的方式给出了系统设计阶段的规范化描述方法,形成了一套系统设计描述语言SysML,相比于传统的系统工程方法,系统设计阶段的信息传递方式由文档、数据等转换为模型传递,MBSE支持模型的动态执行,使得模型演化成为可能,MBSE还支持多视角描述复杂工程体系的行为和规律<sup>[8]</sup>,为复杂体系建模提供了有力支撑,严格规范的图形化模型降低了信息传递错误的概率,提高了系统开发的效率,方便组件模型模块,便于后续模型的重用。MBSE继承和发展了传统的系统工程开发模式,使得人们在研究复杂工程体系的道路上迈出了重要的一大步。

继续从复杂产品V型研发模式来审视MBSE,MBSE在系统设计阶段实现了以模型驱动的开发方式,提供了围绕模型全生命周期的描述规范,使得人们可以从多个视图分析复杂产品模型,然而,MBSE并没有彻底解决传统系统工程研发模式实物集成阶段存在的局限。而仿真技术(如虚拟样机)是解决这一问题的有力手段,通过仿真可以实现数字化集成与测试,从而在进行实物集成之前及时发现设计方案存在的问题,这样可以大幅提高设计研发的效率、降低成本并最终实现制造一次成功。但目前MBSE基于SysML建立的系统图形化模型主要支持系统架构的逻辑验证,并不能直接开展全系统动态行为(物理特性)的仿真计算,仿真阶段需要借助其他仿真软件或工具(如Matlab, Modelica等),通过接口转换和匹配实现与特定仿真软件所建立的描述系统行为的专业仿真模型进行集成,最终实现系统的仿真验证。这种方式难以保证模型的一致性,不利于问题回溯以及模型的维护和重用,而且随着系统复杂性的提高,建模和仿真运行的效率都会显著降低。

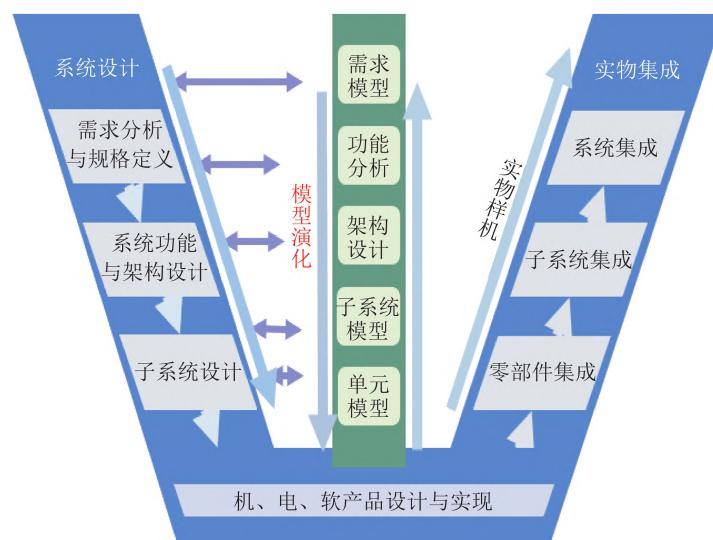


图2 基于模型的系统工程(MBSE)研发模式  
Fig. 2 Model-based system engineering development mode

2015年Daniele Gianni等提出基于建模仿真的系统工程(M&S-based systems engineering, MSBSE)<sup>[9]</sup>,通过全面应用建模仿真技术,提升MBSE的价值,提高对全系统进行数字化评估和优化的能力,从而帮助系统工程师在更大范围内发现系统设计中早期的错误,从而最大限度地降低研发成本<sup>[10]</sup>。

而对于前面提到的复杂工程体系,为了应对体系所具备的不同于普通系统的特点,可将MSBSE进一步拓展为“基于建模仿真的体系工程(modeling & simulation based system of systems engineering, MSBS2E)”。基于MSBS2E的复杂产品研发模式如图3所示。MSBS2E旨在实现复杂工程体系全体系统一建模与仿真,追求顶层设计模型与底层仿真模型的一致性,方便问题的快速回溯定位,以提高复杂系统的迭代开发效率,有利于后期各组件模型的维护和重用。MSBS2E是MBSE与建模仿真技术深度融合的结果,是对MBSE理念的完善和深化。

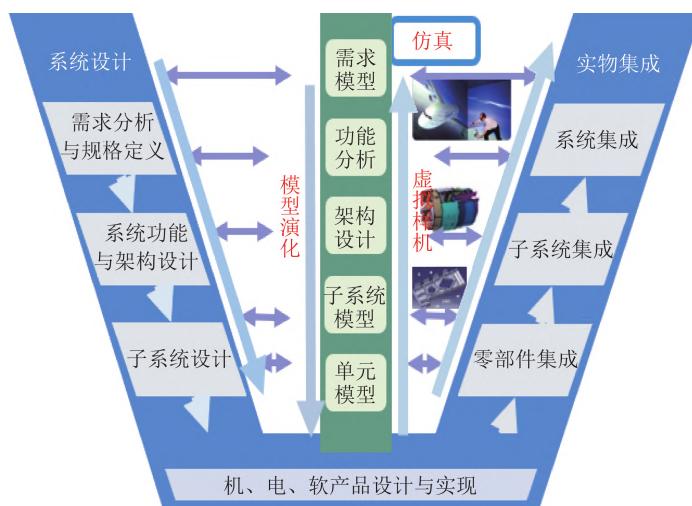


图3 基于建模仿真的体系工程(MSBS2E)研发模式  
Fig. 3 M&S-based system of systems engineering development mode

## 2 复杂工程体系建模仿真的特点

由于工程体系自身的复杂特性,使得其建模仿真也体现出不同于传统的建模仿真技术的新特点,分析这些特点,将有助于MSBS2E的研究和应用。

### 2.1 模型复杂,难以构建和管理

复杂工程体系本身是一个复杂系统,包含多个组件系统,不同组件系统之间具有不同的关联关系,每个组件系统内部具有独特的功能特性,其内在机理很难具体描述,因此具有很高的复杂性。复杂工程体系模型结构的复杂性和包含的不确定性,使得其验证、校核和确认过程(VV&A)面临前所未有的困难。这使得建立可信的复杂工程体系的模型不得不面对高昂的建模成本<sup>[11]</sup>。

复杂工程体系模型往往具有较长的生命周期,而且处于不断的演化过程中。而各个组件往往由不同领域、不同部门的人员采用不同的语言、架构、平台或工具开发,开发过程缺乏统一的标准规范的约束,导致模型重复开发且异构严重,因而难以集成和重用,并对模型全生命周期的维护和管理带来巨大挑战。

### 2.2 模型种类不断扩展

随着信息物理融合系统(CPS)、物联网、大数据、云计算、虚拟现实和人工智能等技术的发展,复

杂工程体系中所包含的模型出现了一些新的形式，这类模型体现出一些不同于传统模型的新的特性，可以统称为新一代数字模型(new generation digital model, NGDM)<sup>[5]</sup>，新一代数字模型又可以进一步分为实时演化的数字模型和非因果模型两类。

实时演化的数字模型是应用信息物理融合技术(CPS)、物联网技术等，实现数字模型与实际物理系统的实时交互，在全生命周期实时演化，保持与物理系统的一致性，比如：数字孪生<sup>[12-13]</sup>等。

非因果模型，指的是利用以神经网络、大数据挖掘技术等建立的从输入到输出的映射关系模型，非因果模型是一种黑盒模型，拥有强大的逼近能力，是当前人工智能技术发展的主要阵地，非因果模型不依赖于系统机理，是对传统基于因果性的建模方式的拓展和补充。

新一代数字模型给与之对应的建模仿真技术提出了新的挑战。由于这类模型的实时性、演化性以及不可解释性，现有的模型理论和方法尚不足以支持对此类模型的分析、验证以及可信性保证。

### 2.3 仿真系统重构困难

仿真系统重构指可以根据不同的仿真场景或想定的场景，重新配置已有的仿真模块，使之符合新的仿真需求。对复杂系统来讲，实现仿真系统的重构，模型需要支持快速的解耦和聚合，需要高效的协同算法，而目前大多复杂系统模型只能支持特定的仿真需求，难以从仿真场景中解聚抽离出来，使得复杂仿真系统重构非常困难，如对同一产品的不同型号进行仿真，往往需要重新构建模型，对同一个复杂体系模型针对不同的想定进行仿真，也需要重新搭建仿真环境，难以实现基于已有仿真系统的快速重构，从而导致研制周期延长，开发成本增加。

### 2.4 难以实现系统级和体系级仿真

对于很多复杂工程体系而言，目前只能实现部件级或者分系统级的集成仿真。因而不能全面分析系统性能，很多潜在的问题，往往需要等到实物集成完毕之后，进行实物验证阶段才能发现，这将对研制周期和成本以及产品的质量产生不利的影响。

## 3 基于建模仿真的体系工程研究热点

基于建模仿真的体系工程方法(MSBS2E)以实现复杂工程体系全系统统一建模仿真为目标，将为复杂工程体系研究提供有力的技术支撑。而由于复杂工程体系自身的复杂特性，MSBS2E需要开发新的理论方法和技术。

### 3.1 模型相关理论方法

构建高质量的可信的模型是MSBS2E的核心和基础。基于模型工程理念<sup>[14]</sup>，需要构建一套系统的、领域无关的针对模型共性问题的理论和方法体系，从而为模型构建、使用、维护和管理等全生命周期提供全方位的指导，确保模型开发和管理过程规范、系统、可控，全方位确保模型可信。模型工程包含一套较为完整的技术体系，下面介绍其中几个典型的关键技术。

#### 3.1.1 支持MSBS2E的建模仿真语言

实现多领域统一建模，实现多学科、多团队、跨平台并行开发，必然要建立一套领域无关的建模方法，为实现不同领域工程人员高效的协作开发，模型描述和建模语言需要兼顾图形化和形式化的表达，也就是在概念模型阶段，模型要准确、规范、利于理解，同时为了保持概念模型与仿真模型的一致性，

又要使得概念模型与仿真模型之间具有标准、规范的映射关系,使得图形化模型描述可以自动转换为形式化文本式的模型描述。模型相关的开发标准,也需要进一步完善,包括模型的描述组件标准、建模语言标准、模型接口标准、模型关联关系描述标准等。

建模仿真语言是模型构建中最为基础和重要的内容之一,围绕着更好地支持复杂工程体系建模仿真,各类新的体系建模语言不断涌现。比如,支持概念模型、需求模型、体系架构模型设计的SysML语言,借助于微分代数方程实现多物理域统一建模的Modelica语言,支持连续系统、离散事件系统建模的DEVS语言规范,支持多智能体建模的Anylogic语言,支持复杂体系全系统仿真的CSML语言<sup>[14]</sup>等。但是,从模型全生命周期来看,目前的体系建模仿真语言依然是围绕着单个阶段或者具体某个领域进行的孤立的研究,仍缺乏实现贯穿模型全生命周期的全系统统一建模仿真语言<sup>[15]</sup>。

本着支持复杂体系全生命周期全系统统一建模仿真的原则,作者团队开发了一种新的一体化智能化建模仿真语言——X语言<sup>[16]</sup>(见图4)。X语言深度融合现有的建模仿真语言(SysML, Modelica, DEVS等)的思想和描述规范,结合了智能系统等复杂工程体系自身特点及开发过程特点,支持连续\离散\混合系统模型、白\灰\黑盒模型、定性\定量模型、多智能体模型,以及神经网络等机器学习模型描述,不仅在产品概念设计阶段提供规范的图形化建模描述,还可将规范的图形化模型自动编译转换成文本化的底层仿真模型,在仿真引擎的驱动下,实现从概念模型设计、系统架构设计、多物理域模型到仿真模型的统一的一体化描述和一体化仿真,从而为基于建模仿真的体系工程提供支持。

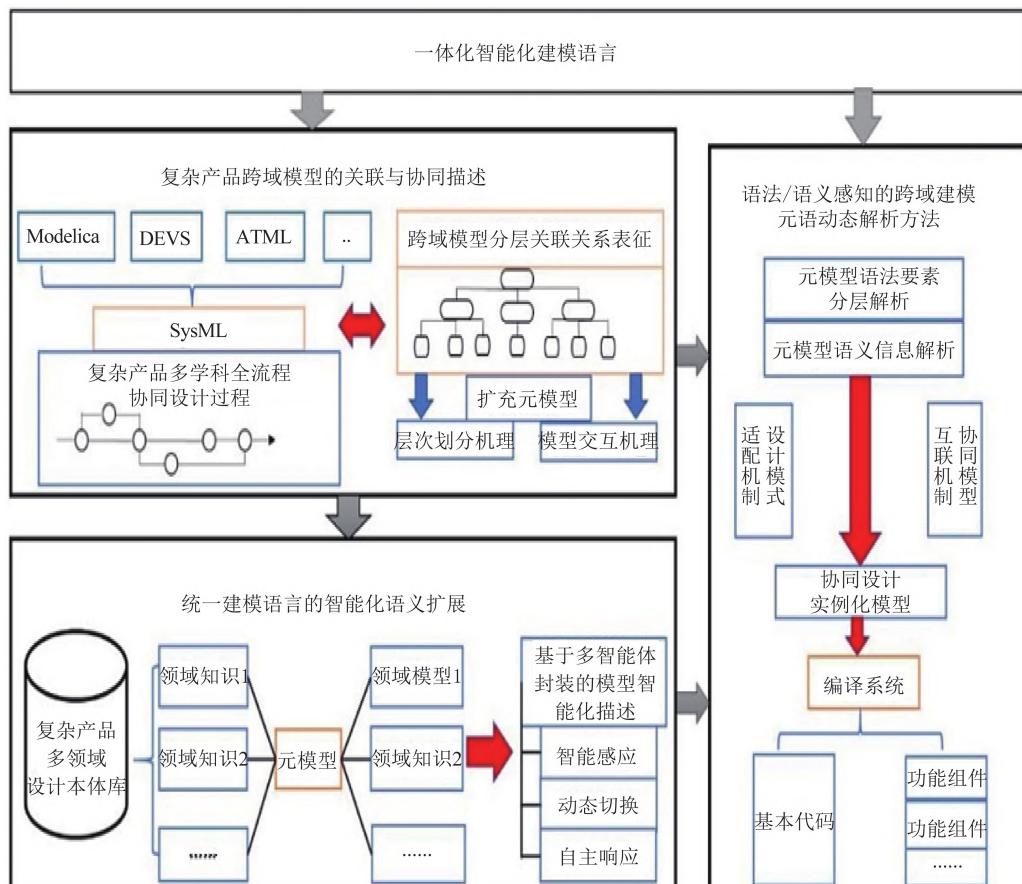


图4 X语言结构图  
Fig. 4 Framework of X language

### 3.1.2 模型开发过程管理

分阶段、孤立地研究分析复杂工程体系建模仿真，难以保证模型的可信性。应当围绕模型需求分析、设计、构建、VV&A、应用和维护等全生命周期，建立一套统一、规范、严格的模型开发方法论，以模型构建过程管理、模型配置管理、模型质量管理为指导，开发相关工具，编写相关标准，确保模型全生命周期可信。模型开发过程管理，应当通过模型驱动的方式，构建模型开发各个阶段的过程模型，形成各个开发阶段的结构框架，通过结构化和优化模型开发过程，保证模型的可信。但目前缺少一套面向建模过程的能力成熟度(M-CMM)评价方法，无法在建模过程的各个阶段针对建模团队或者个人是否规范、标准地完成任务进行定量评估，这为模型开发过程管理带来了困难，这个方面可以借鉴软件工程中软件开发成熟度(CMMI)评级方法，通过这一类评估方法和规范，来评估模型开发过程的成熟度，从而改进模型开发过程、提高开发效率、降低开发成本。经验证明，在模型开发前期做好过程管理，利用所获取的特定知识正确决策，可以最大程度上降低后期模型不达标所要付出的额外成本。

### 3.1.3 模型重用和共享

模型重用是提高开发效率和质量，防止重复开发的重要手段，特别是对于复杂工程体系等一系列复杂系统而言尤其重要。实现模型重用，首先要构建模型库，对模型库中的每一种模型进行科学的描述与管理，还应当对模型进行质量评估<sup>[17]</sup>。

模型重用与应用场景密切相关，即是上下文敏感的。在不同场景下，同一个模型可能有不同的表现，这给模型重用带来很多困难。模型重用问题虽然很早就被提出，但到目前仍缺乏一套完善的基础理论支撑，而随着所研究的系统的复杂性越来越高，模型重用也变得越来越困难。

模型重用最大的障碍在于缺乏标准化的描述，如果不能对模型本身或者模型功能达成一致的描述方式，将使模型重用面临一系列难题，因此，需要对模型本身、模型功能、模型输入输出等建立一致性的描述标准，而基于本体、知识图谱等技术构建领域内和跨领域识别和使用的权威词库将极大地促进对模型的理解。另外，上下文管理对于模型重用也至关重要。上下文是指事物发生的关联条件(如环境、设置等)，对于模型重用而言，需要一个上下文框架抽取建模仿真的关键属性，以便更好地理解模型开发的目的和模型使用的场景，从而为用户提供足够的信息以做出明智的决策。一般来说，模型提供的信息很少，而许多还在使用的模型，已经无法找到最初的开发者，因此无从知道这些模型是如何被开发出来的。因此还需要研究根据直接或间接信息自动生成上下文的方法和技术。

模型组合是模型重用的重要形式和手段。模型的可组合性判断是模型组合的基础性理论问题，目前仍缺乏相关的理论方法。在工程实践中，即使通过工具辨识出可能用于某个潜在问题的可用模型，也不能保证它们可以组合形成一个复杂系统或体系。另外，模型发现需要元数据支持，而如何对模型元数据进行语义标注也需要开发相应的方法和技术。部分模型的使用需要特定领域的知识进行模型接口匹配、模型选择、模型验证等，如何利用知识管理理论方法支持模型重用也是重要的研究领域。

基于云服务实现模型的重用和共享已引起广泛的重视，并有望成为一种主流的模式。利用云平台，将模型与仿真以及模型配置、重用、组合等工具进行服务化封装，在平台上进行发布，汇聚形成模型资源池，用户可以根据自身不同的需求选择不同的模型服务，也可以将自己的能力接入云平台。开放的云平台将为高效的模型重用和共享提供强有力的支持<sup>[18-19]</sup>。

### 3.1.4 模型定量分析和可信评估

在模型全生命周期过程中,均需要各自相对完善的量化分析理论,在需求分析阶段,需要定量分析所设计的模型是否可以满足用户需求,在设计阶段,需要定量分析模型成本,由各种不确定性带来的风险分析、复杂性分析等,在应用阶段,需要定量分析模型的可重用性、可组合性等,在验证阶段,需要对整个模型的可信性进行全方位的、准确的可信性量化分析和评估等等。而当前,仍然缺乏完善的定量分析理论和工具。特别是针对复杂模型的可信评估问题,目前并没有一套通用的评估方法,甚至关于模型可信的定义业内亦没有统一的认知。因为模型不可能完全真实地反映真实物理系统,只能在特定的需求下,近似地模拟实际系统,而如何定量地描述这种相似程度,是一项非常艰巨的任务。在不同的领域、不同的场景下可能会有不同的表述,但模型的可信度却直接关系到整个复杂体系建模仿真任务的有效性,因此,挖掘评估模型可信的共性指标,建立一套通用的、规范的可信评估方法论,对于建模仿真技术的发展和应用具有重要的现实意义。

## 3.2 计算方法与平台

复杂工程体系仿真由于其自身的复杂特性,对仿真计算的求解速度、效率、精度、可靠性等多方面提出了新的要求,这对仿真平台的通讯能力、存储能力、计算能力均提出了较高的要求。为此,需要开发与之对应的新型计算方法与平台。

### (1) 新型计算平台

过去几十年中,计算平台有着巨大的发展和变化,计算平台进步带来的潜能尚未被建模仿真技术充分挖掘。为适应复杂工程体系的仿真要求,应发展大规模并行计算,研发新型可扩展算法和资源管理技术以适应现代多核超级计算机,提高大规模计算能力和效率。比如:针对大规模计算集群,研究与复杂工程体系建模仿真技术适应的智能资源调度算法<sup>[20]</sup>,针对云环境下的分布式仿真架构,研究云、边、端一体化的智能协同计算模式等。

为应对复杂体系组件系统异构的仿真问题,应该探索发展基于异构计算平台的并行仿真技术,比如:研究异构计算平台规范接口转换标准、异构计算平台协同算法等,探索高效利用异构计算平台和简化仿真程序开发的方法(如低代码甚至无代码开发模式)。

### (2) 下一代仿真平台与仿真架构

下一代计算模式,如类脑计算、量子计算等正在蓬勃发展。深度神经网络近几年来取得了非常大的成就,在很多领域的表现已经超越了人类,但是其代价是巨大的能源消耗,而且泛化能力、鲁棒性差,不具备自我主动学习能力,诸多脑科学领域、类脑智能领域的科学家对人脑的工作机制进行了深入研究<sup>[21]</sup>,提出了以神经计算、类脑计算为代表的新型仿生计算模式,这些计算模式有望提供低功耗、高效率的计算方式。量子计算,也是一种新型的计算模式,以量子算法为基础,改变了传统以冯·诺伊曼架构为基础的计算方式,理论上它可以凭借高效并行的算力解决当前计算模式下诸多NP问题<sup>[22]</sup>,这些新型计算模式将带来计算平台的深度变革,提供根本性的计算效能提升。随着人们对复杂工程体系等复杂体系研究的深入,一方面,下一代仿真平台与仿真架构应该依托这些新的模式,开发满足面向体系的新型分布式仿真架构<sup>[23]</sup>,构建未来智能组件组成的复杂仿真系统,满足未来对智能体系的研究,另一方面,仿真平台与仿真架构也应该为这些新型智能领域的研究工作提供支持,研发适应该类研究的新型仿真模式,帮助人们深入研究这类复杂系统的工作机理,促进该类研究进一步发展。

### 3.3 不确定性问题研究

#### (1) 复杂工程体系模型中的不确定性

模型不可能完全还原真实的物理对象，建立模型的过程中会不可避免地引入不确定性。特别对复杂体系模型而言，模型的建立需要涉及多物理领域的知识，并根据不同视角、不同分辨率，跨时间、空间尺度进行建模，每个物理领域都需要特定的物理定理和公式来描述对象行为和现象，往往由于对物理对象认识不充分、对模型参数辨识、观测不准确，而使得模型失真，不同尺度下建立的模型也存在彼此不一致、信息丢失等问题，这些都会导致模型的不确定性，而且对这些不确定性难以进行客观定量的分析。而体系中的各组件系统更是由不同团队采用不同方法和工具开发，带来的不确定性各不相同，因此采用这些组件模型组合形成更复杂的体系模型时，又会带来新的不确定性。各组件系统之间存在复杂的关联关系，这给分析不确定性在系统中的传播带来了困难。在模型使用过程中，模型重构、配置、重用等过程也存在不确定性，模型运行过程中，由于环境的不确定也会带来不确定性，如何定量分析不确定性在这些过程中产生的影响，从而管理这些不确定性，是亟待解决的问题。

#### (2) 不确定性量化分析方法

不确定性量化分析主要是采用数学方法对不确定性进行描述，以便更准确地使用模型进行预测或决策。当前可用于不确定性量化分析的理论方法包括基于概率理论的方法、贝叶斯推理、基于D-S证据理论的方法、基于模糊集理论的方法等<sup>[24]</sup>，但目前的不确定性分析理论研究往往只聚焦于特定的场景，尚需要研究在不同的应用场景下，具有普适性的不确定性分析理论。

随着新一代信息技术的发展，不确定性量化研究也需要探索一些新的途径，如利用大数据来分析和提取不确定性的特征、通过整合跨领域的专家知识来认识和管理系统不确定性等。而在工程实际中，某些参数往往难以获取或者只能获取到一小部分数据，因此，研究针对不确定性问题基于有限数据的量化分析理论和方法也是需要研究的一个重要方向。

#### (3) 决策中的不确定性分析

通过建模仿真协助决策，是仿真的重要目的之一。基于仿真的决策过程同样存在不确定性。这种不确定性与模型本身的不确定性相互关联又有所区别。决策过程中考虑不确定性因素则有助于提高决策的正确性。研究决策中的不确定性问题不只是要发现其中的不确定性，更重要的是要管理不确定性，从而最大限度地降低不确定性对决策产生的影响。复杂工程体系中的决策可能由不同组织做出，从而形成序列式决策网络，研究决策网络中不确定性也是极具挑战性的课题。针对决策中的不确定性研究，还包括支持决策的建模方法、不确定性管理以及风险管理等。

#### (4) 人的因素

建模过程是由人来主导完成的，建模者在建模过程中总会存在一些主观性，这本身也会给模型带来不确定性，如何克服这种主观性对建立可信的模型非常重要。常见的有人参与的工程体系包括医疗体系、社会-技术体系、金融体系、人在回路的体系等，都会存在由于人自身的难以预见的主观的不确定行为而带来的不确定性，这也使得这类体系的建模仿真更加困难，因此，需要对人为因素导致的不确定性以及由此给系统性能带来的风险进行量化分析。这方面的研究需要引起足够的重视。

## 4 结论

随着科学技术的进步,工程系统变得越来越复杂,对建模仿真技术的需求也越来越迫切,同时也给建模仿真技术提出了更高的要求和挑战。

近年来,基于模型的系统工程(MBSE)以模型贯穿整个系统工程全过程,正成为研制和分析复杂工程系统的重要手段和方法,受到国内外学术界和企业界的广泛重视。基于建模仿真的体系工程(MSBS2E),是在基于模型的系统工程(MBSE)的框架下,充分利用建模仿真的理论方法和工具,真正实现复杂工程系统的全系统、全流程的统一建模和仿真,以及系统架构和动态行为(物理特性)的统一建模和仿真。

作者团队自主开发了一种一体化建模仿真语言——X语言,以及配套的统一建模仿真环境和仿真引擎,从语言层面实现了系统设计与仿真的统一,充分体现了MSBS2E的理念。

本文还讨论了支持MSBS2E的计算方法与计算平台所涉及的关键技术,并对复杂工程系统中的不确定性问题进行了分析,给出了一些需要重点关注和研究的方向。

要全面实现MSBS2E还需要开展大量的基础理论方法的研究,并在工程应用中不断实践和完善。

## 致谢

感谢北京仿真中心施国强研究员、林廷宇高工,吉林大学张雪松博士、北京信息科技大学赵淳博士、华如科技陈敏捷博士,以及国家重点研发项目(2018YFB1701600)“复杂产品建模与仿真系统”全体参研人员对本文的贡献。

## 参考文献

- [1] 张鹏翼,黄百乔,鞠鸿彬. MBSE: 系统工程的发展方向[J]. 科技导报, 2020, 38(21): 23-28.  
Zhang Pengyi, Huang Baiqiao, Jü Hongbin. MBSE: Future Direction of System Engineering[J]. Science & Technology Review, 2020, 38(21): 23-28.
- [2] 吴忠杰,张耀中,杜支强,等. 复杂网络理论下军事体系对抗的研究进展[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2014, 11(2): 52-61.  
Wu Zhongjie, Zhang Yaohong, Du Zhiqiang, et al. The Research Progress of CNT-Based Military Forces System of Systems [J]. Complex Systems and Complexity Science, 2014, 11(2): 52-61.
- [3] M Martínez-García, E Hernández-Lemus. Health Systems as Complex Systems[J]. American Journal of Operations Research (S2160-8830), 2013, 3(1A): 113-126.
- [4] Sokha Y, Jeong K, Lee J, et al. A Complex Event Processing System Approach to Real Time Road Traffic Event Detection[J]. Journal of Convergence Information Technology(S1975-9320), 2013, 8(15): 142.
- [5] 张霖,周龙飞. 制造中的建模仿真技术[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(6): 1997-2012.  
Zhang Lin, Zhou Longfei. Modeling & Simulation Technology in Manufacturing[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30 (6): 1997-2012.
- [6] Rainey L B, Tolk A. Modeling and Simulation Support for System of Systems Engineering Applications[M]. New Jersey: Wiley, 2015.
- [7] INCOSE. Systems Engineering Handbook: A Guide for System Life Cycle Processes and Activities[M]. 4th ed. New Jersey: Wiley, 2015.
- [8] Henderson K, Salado A. Value and Benefits of Model-based Systems Engineering (MBSE): Evidence from the Literature[J]. Systems Engineering (S1098-1241), 2021, 24(1): 51-66.
- [9] Gianni D, D'Ambrogio A, Tolk A. Modeling and Simulation-Based Systems Engineering Handbook[M]. Taylor & Francis Group, 2015.
- [10] Zeigler B P, Marvin J W, Cadigan J J. Systems Engineering and Simulation: Converging toward Noble Causes[C]//

- Proceedings of the 2018 Winter Simulation Conference, December 9-12, Gothenburg, Swede, 2018: 3742-3752.
- [11] 张霖, 张雪松, 宋晓, 等. 面向复杂系统仿真的模型工程[J]. 系统仿真学报, 2013, 25(11): 2729-2736.  
Zhang Lin, Zhang Xuesong, SONG Xiao, et al. Model Engineering for Complex System Simulation[J]. Journal of System Simulation, 2013, 25(11): 2729-2736.
- [12] 张霖. 关于数字孪生的冷思考及其背后的建模和仿真技术[J]. 系统仿真学报, 2020, 32(4): 1-10.  
Zhang Lin. Cold thinking about Digital Twin and the Modeling and Simulation Technology behind it[J]. Journal of System Simulation, 2020, 32(4): 1-10.
- [13] Zhang L, Zhou L F, B. K P Horn. Building a Right Digital Twin with Model Engineering[J]. Journal of Manufacturing Systems (S0278-6125), 2021, 59: 151-164.
- [14] 周文, 迟鹏, 李伯虎, 等. 复杂系统建模仿真语言编译器的实现与应用[J]. 系统仿真学报, 2016, 28(7): 1528-1537.  
Zhou Wen, Chi Peng, Li Bohu, et al. Implementation and Application of Complex System Modeling and Simulation Language Compiler[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(7): 1528-1537.
- [15] 叶新, 潘清, 董正宏. 多领域建模仿真方法综述[J]. 软件, 2014, 35(3): 233-236.  
Ye Xin, Pan Qing, Dong Zhenghong. Comparison of Multi-domain Modeling and Simulation Technology[J]. Computer Engineering & Software, 2014, 35(3): 233-236.
- [16] Zhang L, Ye F, Laili Y J, et al. X Language: An Integrated Intelligent Modeling and Simulation Language for Complex Products[C]// Annual Modeling and Simulation Conference (ANNSIM 2021), George Mason University, Virginia, USA, 2021.
- [17] 刘营, 张霖, 赖李媛君. 复杂系统仿真的模型重用研究[J]. 中国科学: 信息科学, 2018, 48(7): 743-766.  
Liu Ying, Zhang Lin, Laili Yuanjun. Study on Model Reuse for Complex System Simulation[J]. Scientia Sinica (Informationis), 2018, 48(7): 743-766.
- [18] 李伯虎, 柴旭东, 侯保存, 等. 一种基于云计算理念的网络化建模与仿真平台——"云仿真平台"[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(17): 5295-5299.  
Li Bohu, Chai Xudong, Hou Baocun, et al. Networked Modeling & Simulation Platform Based on Concept of Cloud Computing—Cloud Computing Platform[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(17): 5295-5299.
- [19] Siegfried R, Berg T W V D. M&S as a Service: Paradigm for Future Simulation Environments[C]// Proceedings Interservice / Industry Training, Simulation and Education Conference, I/ITSEC 2015, 30 November-4 December 2015, Orlando, FL, USA, 2015: 1668- 1676.
- [20] 孙震宇, 石京燕, 孙功星, 等. 大规模异构计算集群的双层作业调度系统[J]. 计算机工程, 2020, 46(1): 187-195.  
Sun Zhenyu, Shi Jingyan, Sun Gongxing. Dual Layer Job Scheduling System for Large Scale Heterogeneous Computing Clusters[J]. Computer Engineering, 2020, 46(1): 187-195.
- [21] 蒲慕明, 徐波, 谭铁牛. 脑科学与类脑研究概述[J]. 中国科学院院刊, 2016, 31(7): 723-736.  
Poo Muming, Xu Bo, Tan Tieniu. Brain Science and Brain-Inspired Intelligence Technology-An Overview[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2016, 31(7): 723-736.
- [22] 张焕国, 毛少武, 吴万青, 等. 量子计算复杂性理论综述[J]. 计算机学报, 2016(12): 2403-2428.  
Zhang Huangguo, Mao Shaowu, Wu Wanqing, et al. Overview of Quantum Computation Complexity Theory[J]. Chinese Journal of Computers, 2016(12): 2403-2428.
- [23] 周隆亮, 徐云鹏, 邓宗平. 体系任务仿真平台架构设计[J]. 现代信息科技, 2020, 4(17): 82-85.  
Zhou Longliang, Xu Yunpeng, Deng Zongping. Systems Mission Simulation Platform Architecture Design[J]. Modern Information Technology, 2020, 4(17): 82-85.
- [24] Fujimoto R, Bock C, Chen W, et al. Research Challenges in Modeling & Simulation for Engineering Complex Systems[M]. Springer, 2017.