



复杂系统仿真的模型重用研究

刘营^{1,2}, 张霖^{1,2*}, 赖李媛君^{1,2}

1. 北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院, 北京 100191

2. 北京航空航天大学复杂产品先进制造系统教育工程研究中心, 北京 100191

* 通信作者. E-mail: zhanglin@buaa.edu.cn

收稿日期: 2017-12-10; 接受日期: 2018-04-08; 网络出版日期: 2018-07-17

国家自然科学基金青年基金 (批准号: 61703015) 和国家自然科学基金 (批准号: 61374199) 资助项目

摘要 在仿真科学技术领域, 模型重用技术是提高建模效率和可信性的重要手段, 也是当前复杂系统仿真领域的研究难点与热点. 本文对模型重用的需求、分类、相关概念、特点等方面进行了分析, 给出了模型重用的知识体系, 从理论、方法与应用角度给出了详细说明, 并总结了目前模型重用研究所存在的一些问题, 最后分析讨论了未来要研究的几个关键问题.

关键词 建模仿真, 仿真模型重用, 可信性, 复杂系统, 模型生命周期

1 引言

建模仿真 (modeling & simulation, M&S) 技术已被广泛应用到科学研究、国防建设及社会生活中的各个领域, 特别是对复杂系统, 如复杂工程系统、复杂交通系统、军事作战系统、复杂医疗系统等研究中, 建模仿真技术发挥着越来越重要的作用^[1,2]. 随着科学技术的不断进步, 各领域应用系统向着大规模、多层次和智能协同方向发展, 越来越多的复杂系统逐渐演变成由多个子系统组成的体系 (system of systems, SoS)^[3]. 作为一种典型的复杂系统, SoS 具有结构复杂、子系统及其环境之间交互关系复杂等特性, 且各子系统均具有自主演化和决策能力, 这些都极大程度增加了复杂系统仿真中模型的开发成本、周期、规模和复杂度.

以某航空航天复杂产品虚拟样机这样的体系仿真开发为例, 其全系统由 10 多个骨干场所、数百家协作单位承担, 涉及气动、动力、控制等多领域, 其零部件、元器件的数量数以万计. 其实际开发中存在的问题包括: 研制各阶段的模型重复开发, 周期长者多达 10 年; 全系统包含了多种模型, 模型异构严重, 难以联合仿真; 跨部门、跨专业的模型难以有效共享.

对于上述复杂系统, 其复杂性体现在: (1) 复杂系统的组成元素很多; (2) 元素之间存在复杂的交互关系; (3) 复杂系统的机理非常复杂, 其总体行为呈现出强非线性、强不确定、混沌、自适应、涌现等

引用格式: 刘营, 张霖, 赖李媛君. 复杂系统仿真的模型重用研究. 中国科学: 信息科学, 2018, 48: 743–766, doi: 10.1360/N112017-00272
Liu Y, Zhang L, Laili Y J. Study on model reuse for complex system simulation (in Chinese). Sci Sin Inform, 2018, 48: 743–766, doi: 10.1360/N112017-00272

特点^[4,5]。这些特性也使得对复杂系统模型的校核、验证和确认 (verification, validation, accreditation, VV&A) 过程非常复杂。复杂系统的这些复杂性直接导致了模型本身的复杂性, 建模成本也随之增多。同时, 在仿真系统构建中, 为了应对跨学科仿真与分析需求以及应用环境的动态性和不确定性变化, 工程人员需要开展大量的模型重建、模型更改与模型验证工作, 模型需要不断地进行调整和演化, 如果重新建立新的模型, 势必会增加建模成本与周期, 同时也无法保证模型在不同应用情景下的可信性。

此外, 随着仿真技术在各领域研究和工程实践中的应用逐步扩大, 各领域内的仿真系统和模型越来越多, 这期间产生了大量重复的冗余的模型描述信息、参数及模型运行数据等信息; 很多模型的应用范围和功能有相似之处, 大量的重复建模在浪费资源的同时, 也增加了对模型和数据的管理难度。在资源高度共享的今天, 研究人员和工程人员普遍希望能够充分利用已有的模型和仿真系统等仿真资源, 快速搭建满足不同应用需求的仿真系统, 在保持建模和仿真有效性的同时, 减少模型冗余和冗余数据所带来的困扰。

因此, 如何充分利用现有技术与模型资源实现多领域、不同粒度的模型重用, 降低复杂系统建模的复杂度, 减少模型开发与维护周期, 避免返工迭代, 增强建模仿真应用的灵活性、可扩展性与可信性, 进而保证仿真应用开发的高效率、低成本、高可信等是当前复杂系统仿真的迫切需求与关注重点^[6]。

国际仿真界对模型重用问题的研究虽然已经有较长的历史, 但随着仿真技术应用范围越来越广和仿真对象的复杂性越来越高, 重用问题仍然是仿真领域的前沿课题。2016 年 1 月, 由美国国家科学基金会 (NSF)、美国国家航空航天局 (NASA)、美国空军科学研究所 (AFOSR)、美国国家建模仿真联盟 (NMSC/NTSA) 等召集全美及欧洲 70 多位顶级仿真专家召开的“工程复杂系统建模仿真中的挑战”研讨会上, 重用问题仍然被列为仿真领域最具挑战性的 4 个研究领域之一^[7]。

目前针对模型重用有很多标准和工具, 然而这些尚未对模型重用形成统一的研究框架, 没有相关明确的定义及方法之间较全面地比较, 且没有形成对模型重用的全生命周期的研究体系。本文将探讨模型重用的相关概念, 按照重用粒度、实质和手段给出其方法的分类, 同时明确模型重用与软件重用的关系, 并指出其特点与实现基础; 在此基础上, 给出模型重用的知识体系, 并分别从仿真模型重用的基础理论研究和实现方法两个层面对模型重用相关研究现状进行综述, 而后比较了模型重用的实现方法; 最后对未来关键研究问题进行讨论与展望。

2 面向仿真的模型重用问题概述

系统的建模仿真过程是以真实系统为研究对象建立其系统的模型, 并在模型上进行仿真试验的过程。复杂系统仿真中所包含的模型有很多。从建模仿真的全生命周期角度来分有需求模型、概念模型、设计模型、可执行模型、仿真运行模型等; 从模型的表现形式来分有结构化模型、半结构化模型、非结构化模型; 从模型的粒度来分有原子模型、组合模型、组件模型、系统模型等; 从实现功能角度来分有计算模型、数学模型、动力学模型等; 在本文中, “模型重用”的研究对象为仿真应用过程中涉及的所有模型。

2.1 模型重用相关概念

(1) 重用 (reuse)。重用是一种方法论, 主要应用在系统开发阶段。Lei^[8]指出: “重用是一种系统快速开发的概念, 其基本思想是在搭建新系统时重用已经建立好的系统构件, 重用的好处是显而易见的, 它可以缩短开发周期, 降低开发成本等”。重用方法可应用在软件工程、人工智能、计算机辅助设计等

很多领域,如软件重用/代码复用、知识重用、设计重用等。

(2) 面向仿真的模型重用 (model reuse for simulation). 关于模型重用的定义,目前还没有一个公认的、标准的、比较全面的描述. 不同的学者或者组织从不同的角度分别给出了模型重用的概念. 2002 年在英国运筹学协会的仿真工作组会议上, Nance^[9] 给出了模型重用的定义,他指出“模型重用是在仿真系统开发中多次重复使用模型组件的过程”. Petty 等^[10] 认为模型重用是“再次使用之前已开发的模型,目的是重新开发新模型或把它应用在新的应用情景下”. Pidd^[11] 则认为“面向仿真的模型重用可视为软件构件的重用,可从代码、函数、组件和完全模型等层次去分析和判断”. 此后有学者从过程角度给出了模型重用的描述^[12]: 模型重用模型在新的仿真应用中重复使用,以避免低水平的重复建模,通过重用成熟的模型实现仿真的系统化、工程化开发. 也有学者结合软件重用的概念给出了它的定义说明^[13]: 在建立模型过程中对已有模型不做修改或稍加改动而对其再利用,或者在建模过程中充分考虑模型重用性构建新的可重用模型。

结合以上学者给出的定义可以看出模型重用的核心思想是: 模型重用以降低仿真开发成本、提高建模效率和质量为目标,通过建立可重用模型或者再利用已有的模型为手段,是一个系统化、工程化、标准化的过程。

(3) 可重用度 (reusability). Balci 等^[14] 认为“可重用度是对工件、方法或者策略被再次使用或者重复的能力的度量,这里的工件主要是指面向仿真的模型或仿真组件”。

也有学者把它称为可重用性^[15],并指出“可重用性是指模型适应不同应用场景并继续使用它的能力,这是对模型在新应用环境中可用性的度量”。

在重用一个模型前,要对该模型进行可重用性判定,按照判定依据判断其是否能将其重新应用在新的仿真应用环境下,可重用性判定准确与否取决于是否有足够充分、正确的模型描述以及完善的可重用判定准则或者方法。

(4) 可组合性 (composability). 模型组合是实现模型重用的一种重要的方式. Petty^[16] 认为:“可组合性是通过选择和采用多样性的组合机制,集成仿真组件构建满足需求的仿真应用系统的能力”. 也有学者指出“可组合性是选择仿真组分,并以多种方式进行装配从而形成有效仿真系统,以满足用户具体需求的能力,关键是可以组合和重新组合仿真组分”. 模型的可组合性关注模型能否可以有意义地组合,以及组合后的有效性,即它关注模型组合的判定及模型组合的验证两方面。

2.2 模型重用方法的分类

借鉴 Pidd 关于软件重用的分类^[11],可将模型重用从重用粒度、重用手段、重用实质 3 方面进行分类. 如图 1 所示。

(1) 按模型重用的粒度: 代码级重用、函数级重用、组件级重用、整体模型级重用. 其中模型的重用复杂度由代码级重用到整体模型级重用逐渐变大,而它们的可重用完成度则正好相反。

在组件级重用中,根据组件内部细节的展示程度,模型重用又可分为基于黑盒的重用、基于白盒的重用和基于灰盒的重用^[17]. 基于灰盒的重用介于“黑白”盒之间,它仅提供接口信息和模型的元数据信息来支持重用,这种方式既可提高模型可信性,也可避免修改模型内部实现,是目前比较常用的方式。

整体模型级重用还可以按照重用部分的规模和复杂程度细分为以下 3 类. (a) 元件级重用: 如一阶环节、滞环等简单环节的模型重用; (b) 部件级重用: 复杂系统中的各个子系统部件的模型重用,例如飞行器系统中的传感器、作动器、无线电通讯等子系统; (c) 系统级重用: 指对整个独立完整的系统

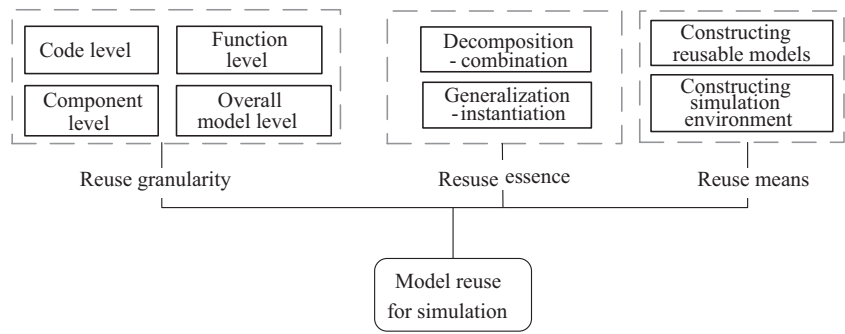


图 1 模型重用方法的分类

Figure 1 Classification of model reuse methods

模型 (舰船、航天器等) 的重用. 在军事攻防对抗系统中, 舰船模型作为舰队编队系统中一个最小单元存在, 为了便于舰船间的通讯交互, 要求在不同的编队系统中的舰船模型具有重用性.

(2) 按模型重用的手段. (a) 构造可重用的模型, 也可以通过完善已有模型本身而达到模型的高度可重用; (b) 构造支持重用的仿真环境, 可以通过构建便于模型重用的支撑环境或者仿真框架.

(3) 按模型重用的实质. (a) 模型分解 – 组合的重用方式: 通过将模型分解为子模型然后再对子模型组合的方式进行模型重用, 如模型组合技术、组合仿真; (b) 模型泛化 – 具化的重用方式: 通过模型泛化而后再具体实例化的方式进行模型重用, 如元模型技术、元 – 元模型技术. 一般情况下采用二者混合的方式来重用模型.

2.3 与软件重用的联系与区别

在模型重用的研究初期借鉴了许多软件工程中的软件重用方法^[18], 如面向对象、模块化、组件化、MDA、基于语义 Web 服务的集成等思想和方法. 但模型重用与软件重用有本质的区别, 与软件重用相比模型重用有以下几个特点: (1) 模型重用与多变的应用情景相关并受其约束, 且模型涉及不同领域, 种类繁多, 模型重用更为复杂; (2) 模型重用不仅仅是代码、组件或功能模块的重复调用或使用, 它更需要有应对复杂需求与系统演化下的自适应性、动态性, 以及跨领域的可扩展性等特性; (3) 模型重用需要保证模型及仿真运行结果的可信, 且与真实对象的一致, 即 VV&A 与可信性评估过程更为复杂.

以面向重用的组件技术为例, 软件组件与模型组件有明显的不同. 首先, 双方的关注点不同. 模型组件更关注时间调度, 操作的实时性, 以及仿真过程中的约束条件等. 其次, 互操作接口不同. 软件组件更关注接口的语法层的接口名、接口的参数定义等, 模型组件除了关注语法层外, 还要求语义层接口一致.

2.4 模型重用的特点

(1) 复杂性. 模型重用的复杂性主要体现在 3 方面. (a) 技术复杂性. 由于应用需求的多样性, 建模人员很难考虑到所有可能的重用情景, 而且在可重用模型的表示上, 需要描述应用情景信息, 技术上存在表示规范或表示不全的问题. (b) 管理复杂性. 指对可重用模型库的管理方面复杂, 需要对各种模型进行校验与确认, 在选择可重用模型时要计算模型的可重用性, 这两方面都极为复杂. (c) 运行复杂性. 相对于传统的“最小性建模思想”, 可重用模型执行起来较为复杂, 同时运行复杂性体还现在其仿真运行环境上, 建立便于模型重用的仿真运行环境或仿真框架需要考虑的因素较多, 较为复杂.

(2) 独立性. 模型重用的独立性体现在如下方面. (a) 仿真参与人员的独立性. 建模人员与集成人员分离, 模型使用者与模型拥有者分离, 模型需要被正确地理解和使用; (b) 建立与使用过程的独立性. 模型要在不同应用中被建立和使用, 与此相对, 相同仿真应用需求下的一个模型被多次重复使用或者被多次重复实例化都不是真正的模型重用.

(3) 系统性. 模型重用过程是一个标准化、系统化的过程. 伴随着模型的整个全生命周期, 零散的、偶尔的模型重用或者仿真系统中的单一阶段的模型重用都不是广义上的模型重用, 因为对于这样仿真过程而言, 其模型是不可信的, 而且不具备后续重用的能力. 系统性要求建模人员要对模型的整个仿真应用方向有所了解, 尽量设计可重用的模型; 同时, 系统性还要求对可重用模型库的管理遵循先存储后重用原则, 在入库前检查模型的兼容性和正确性, 以保证模型质量^[8].

(4) 多阶段性. 模型重用的多阶段性包括了多阶段建模、多阶段验模、多阶段评估等方面. 此外, 多阶段性还体现在对模型重用效益的多阶段综合评价, 模型重用针对不同阶段的人员和过程产生的收益不同. 比如设计新的可重用模型时增加了成本, 但在模型集成和维护阶段则提高了效率, 降低了成本.

由于以上特性, 复杂系统仿真中的模型重用过程实施较为复杂, 提高模型本身的可重用性是关键, 做好以下基础工作将提高模型的可重用性、可信性及可扩展性.

标准化. 标准化、规范化是实现模型重用的基础, 在模型的全生命周期过程中, 每个步骤、活动都需要有相应的规范、标准, 包括需求建模、模型设计、模型验证、模型存储、模型评估等. 此外还可以通过定义标准的输入/输出模型接口来统一建模规范, 进而提高模型的可重用度.

层次化. 层次化是组织复杂模型的有效方法, 同时层次化可以有助于明确实现仿真系统的多粒度建模, 进而实现模型全生命周期中不同阶段的模型重用. 例如军事对抗系统是由多个子系统组成的, 每个子系统又由一些线性或非线性环节组成. 对于当前任务, 模型的层次化有助于从上到下, 从整体到局部对多层任务解构, 方便我们建模和重用. 层次化有助于模型的纵向开发.

多阶段化. 在复杂系统建模仿真过程中, 直接抽象出反应真实系统对象的模型非常困难, 模型的 VV&A 也较难实现, 借鉴美国国防部的 CMMS 体系将复杂系统建模过程分为多个阶段分别建模, 对问题进行多阶段不同程度的抽象, 有助于实现各阶段的模型重用. 通常情况下, 模型重用需要以多阶段建模开发方法为主线, 结合其他模型重用的关键实现技术进行综合集成建模与重用, 从不同阶段来实现模型重用. 多阶段化有助于模型的横向开发.

3 仿真模型重用的发展与演化

在学术界, 早在 1976 年 Zeigler 和 Ören^[19] 就针对模型的异构集成了提出一些建模范式方法来解决异构模型的重用问题. 直到 1986 年, Huhn 等^[20] 才明确提出模型重用问题, 随后各国开始重视对模型重用的研究, 并对其进行了深入的研究和探索.

在工业界, 在 80 年代中期由美国军用仿真界提出模型的可重用性问题, 并逐步开展研究. 1994 年 5 月, 美国军方制定了第 1 个 Master Plan, 计划中以确保建模过程的通用性、可重用性和互操作性为目标, 介绍和定义了建模与仿真的标准化过程^[21]. 与此同时, 美国军事建模与仿真办公室也开始用系统化的方法来解决这个问题, 运用自下而上的方法来研究建模与仿真的标准化过程. 美国国防部建模仿真办公室 (Defense Model and Simulation Office, DMSO) 也于 2003 年提出了可组合使命空间 (composable mission space environments, CMSE) 的研究建议, 目的也是全面提高模型的可重用性和仿真的互操作性^[22].

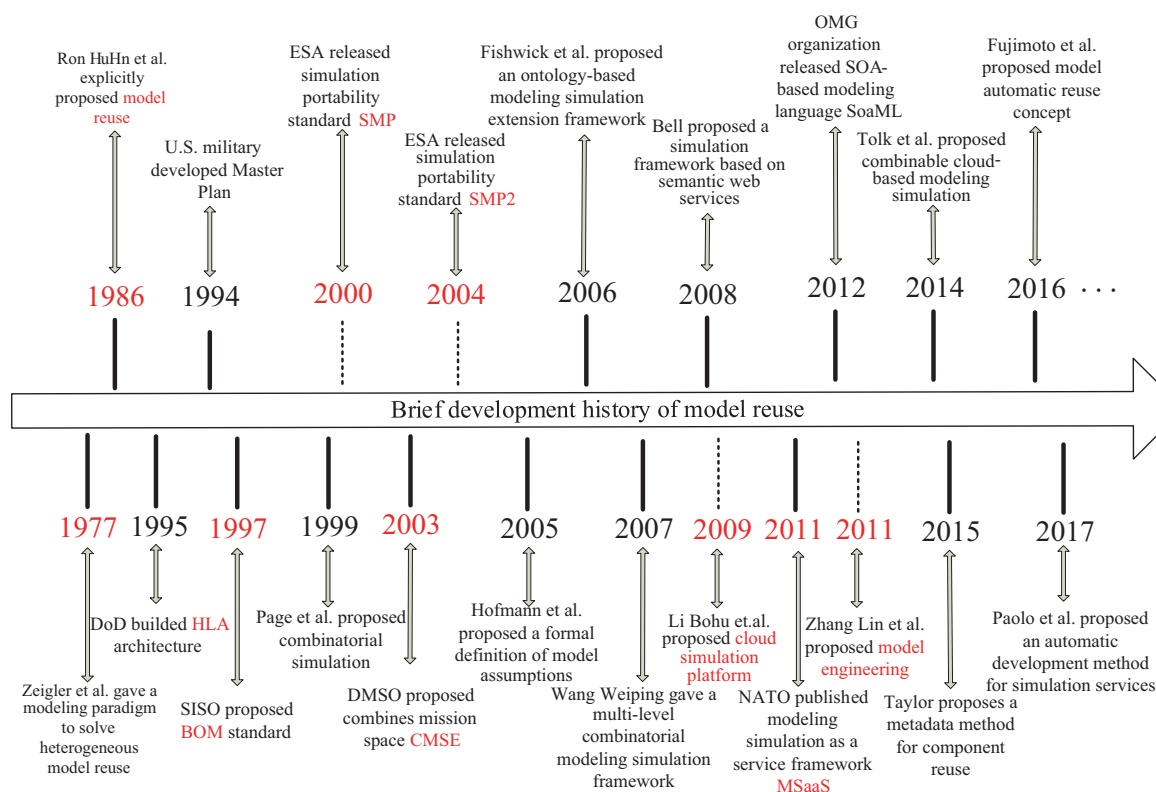


图 2 (网络版彩图) 模型重用研究的发展历程
Figure 2 (Color online) The development of model reuse

以时间为主线, 主要关键技术为节点, 模型重用研究发展历程可表示为图 2, 模型重用问题被提出之后 30 多年的时间里, 相关的研究紧凑、发展迅速. 从研究内容角度来看, 可以从模型重用理论、方法、应用 3 方面来简要回顾相关研究发展历程.

在模型重用理论方面. 1994 年, Saulnier 等^[23]以图形建模仿真环境为对象分析了其对模型重用的影响. 1996 年, Pos 等^[24]构造了模型假设描述框架, 也考虑了应用情景问题. 2000 年, Pace 等^[25]建议重点考虑概念模型的重用, 避免被实现方法与技术所束缚. 2002 年, Petty 等^[26]给出了要实现重用必须要解决的几个关键问题. 2003 年, Overstreet 等^[9]研究了基于模型重用建立的组合仿真及其有效性校验问题. Tolk 等^[27]从仿真互操作的角度, 研究了从多层次互操作角度实现模型重用. 2004 年, Yilmaz^[28]提出了面向重用的“模型-仿真器-应用情景 (MSC)”概念框架并建立了相应的应用情景概念模型. 同年, Malak 等^[29]针对工程设计领域模型, 研究了其重用后校验时的相关知识的形式化描述. 2005 年, Hofmann^[30]给出了模型假设的形式化定义, 从变换函数、假设目的、假设可用性角度对模型假设进行分类. 2007 年, Wang 等^[31]在 Tolk 等^[27]研究的概念互操作模型基础上, 将可组合性划分 5 个层次进行分析, 并给出基于多层次的组合建模仿真框架. Bell 等^[32]提出了基于语义 Web 的模型重用的框架. 2011 年 Zhang 等^[33~35]提出模型工程的概念, 给出了模型工程的知识体系, 为模型重用的规范化、标准化、技术途径等方面提供了基础保障. 2014 年 Tolk 等^[36]提出了一种可组合的基于云的建模仿真服务新模式. 2016 年 Fujimoto 等^[37]提出了一种用元数据的技术来实现用模型组件自动重用的模式; Xiong 等^[38]设计了智能体模型 (agent simulation model, ASM) 的动态组合方法,

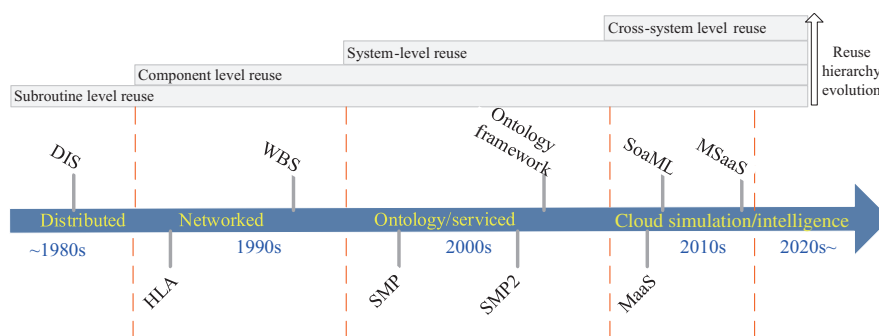


图3 (网络版彩图) 模型重用的演化过程

Figure 3 (Color online) The evolution of model reuse

并应用于某空间攻防对抗模型体系. 2017年 Bocciarelli 等^[39]提出了基于 Web 建模的仿真服务自动开发方法, 并通过 MSaaS 平台提供仿真服务. 2018年 Deng 等^[40]基于微服务架构提出了一种微服务模型重用机制, 提高了仿真开发效率.

在模型重用技术与方法方面, 一些经典的方法和技术如: 元模型技术^[41]、组件技术^[42]、高层体系架构 HLA^[43]、基本对象模型 BOM^[44]、模型驱动架构 MDA 技术^[45]、模型可移植性规范 (SMP/SMP2)^[46, 47]、支持模型重用的建模语言 (SRML^[48], Modelica^[49] 等)、开源仿真语言 (SML^[50])、支持模型重用的建模环境和运行环境 (COTS^[51], Simulink^[52] 等)、基于语义 Web Service 的模型重用框架^[53]等. 近年来随着基于网络化环境的建模仿真、基于本体技术的建模语言, 以及基于 SOA 架构等技术的发展, 出现了一些新的方法, 主要有: 基于面向服务架构 SOA 的建模语言 (SoaML^[54])、基于 DEVS 的建模语言 (DEVSMML^[55])、建模仿真即服务框架 (MSaaS^[56])、基于本体的建模语言 DEVSMO^[57]、面向服务的建模仿真方法^[58], 以及基于概念模型实现重用的方法^[14]等.

在仿真应用方面, 模型重用的主要应用在包括面向分布式仿真应用^[59]、协同仿真应用^[60]、组合仿真应用^[61]、模型管理应用^[62]、异构模型集成应用^[63]等方面.

四十几年来, 随着计算机软硬件技术及网络技术的发展, 建模仿真技术经历了由分布式仿真向网络化仿真演化, 由网络化仿真向本体/服务体仿真方向演化, 由本体/服务化仿真向云仿真/智能化仿真方向演化的过程. 模型重用技术也随之有类似的发展演化过程, 在每个时期的代表技术分别为: 分布式交互仿真 DIS, HLA, SMP, MSaaS 等框架或标准, 如图 3 所示. 与此同时, 在该演化过程中, 从仿真层次和应用粒度角度, 模型重用技术也经历了子程序级、组件级、系统级、跨系统级 4 种重用等级的演化过程^[64].

4 模型重用的知识体系

模型重用是一个系统工程, 更是一个体系工程, 它贯穿于模型全生命周期的需求分析、设计、构建、VV&A、应用、维护、管理等各个阶段. 通过对模型重用需求研究分析, 借鉴系统工程、建模仿真理论、项目管理等多学科知识体系, 给出了模型重用研究的知识体系框架, 如图 4 所示. 从建模仿真系统应用角度来讲, 模型重用主要有以下 3 种应用场景:

(1) 建模仿真系统更新. 在之前版本的仿真系统的基础上, 增加一些新功能, 或者有其他方面的更新, 形成新的仿真系统, 需要研究如何重复使用模型, 同时要保证同一系统演化后模型的有效性.

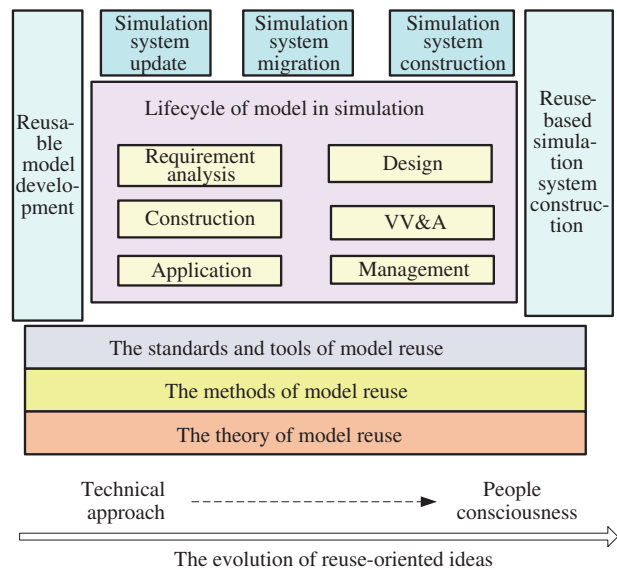


图 4 (网络版彩图) 模型重用知识体系图

Figure 4 (Color online) The model reuse knowledge system framework

(2) 建模仿真系统移植. 仿真系统需移植到新的软件平台上或者新的仿真环境下运行, 受到新的应用情景约束, 需要用研究模型重用理论与技术, 以适应跨领域、跨平台带来的模型异构性.

(3) 创建新的建模仿真系统. 创建新的仿真系统时, 将已有模型或新开发的模型应用于新的仿真应用环境. 需要确认模型的功能和背景能够满足新系统的要求, 然后应用模型重用技术实现, 并确保仿真结果的可信性.

从仿真的实施过程来看, 模型的重用研究主要涉及两个方面: (1) 从无到有地开发可重用模型; (2) 面向可重用模型的仿真应用系统构建 (模型的集成、部署和管理维护等).

模型重用的关键是要提高模型本身的可重用性, 提高可重用性主要从两个方面进行研究: (1) 提高建模者建立可重用模型的意识; (2) 提供支持对已有模型进行重用的技术途径. 在模型重用技术演化的过程中, 仿真参与人员的重用意识会逐步起到主导作用.

另外从模型重用研究的基础到应用的角度, 模型重用知识体系主要包含: 模型重用基础理论、模型重用方法、面向重用的模型标准工具、系统化管理与应用等研究.

通过图 4, 还可以把模型重用的知识体系简单概括为 5 部分: (1) 模型重用理论基础研究; (2) 模型重用相关标准研究; (3) 模型重用的全生命周期研究; (4) 模型重用的实现与应用研究; (5) 模型重用支撑工具研究.

除了以上基础要素以外, 还需要研究影响模型重用的其他因素, 如组合模型的问题, 模型重用是可组合性原则的核心目标之一, 也是仿真可组合性的关键支撑技术; 另外, 还需要研究模型库、模型管理等方面的问题, 以保证模型的正确存储与快速检索等, 为模型重用提供支撑.

总之, 模型重用知识体系首先应当需要建立一个完整的、成熟的理论体系, 并以此为基础对方法、技术、标准、工具等提供基本的指导和保障. 其次, 要有与理论相对应的方法与技术, 作为理论基础的具体体现, 为模型重用提供具体可行的方案. 然后, 在理论与方法的结合下给出一些针对应用的、成熟的、便于重用的概念框架, 并执行重用过程. 同时围绕它们的需求分析、设计、构建、V&A、应用、维护管理这一全生命周期过程, 通过质量管理、配置管理等手段来完成. 最后, 模型重用技术在具体的

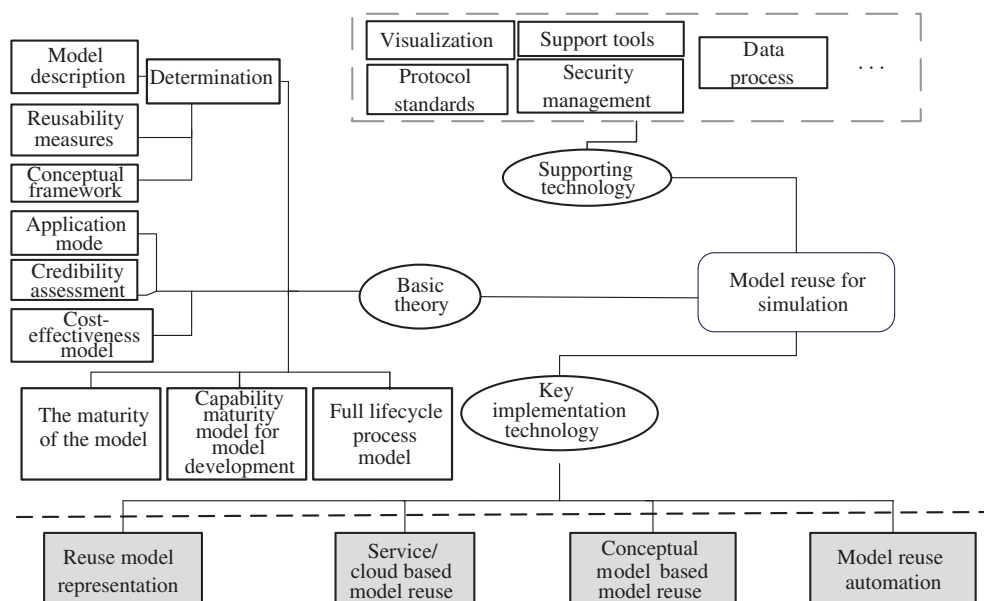


图 5 模型重用关键技术研究

Figure 5 Model reuse key technologies research

仿真系统更新、移植与新建这 3 方面应用中得以体现。在模型重用的实现过程中, 对建模人员、仿真人员、集成人员等仿真参与人员的面向重用的意识也提出了更高的要求, 这就要求重用体系在技术途径的基础上逐步演化到成熟的人员意识中, 让面向重用思想存在于模型的全生命周期中。

5 模型重用关键技术研究

本文从基础理论、关键实现技术、支撑技术 3 个方面给出模型重用关键技术研究, 如图 5 所示。

5.1 模型重用的基础理论研究

5.1.1 全生命周期过程模型

仿真模型重用是一个系统工程, 更是一个体系工程, 它贯穿于仿真模型生命周期的需求分析、设计、构建、VV&A、应用、维护、管理等各个阶段, 模型重用的生命周期过程一般包含的过程有: 模型重用需求、模型选择、模型可重用性评估、可重用模型构建、可重用模型 VV&A、可重用模型运行、可重用模型维护等, 用于规范和指导重用过程。在建模仿真领域, 关于 M&S 的全生命周期研究很多 [65~68], 其中 Balci [68] 给出的关于建模与仿真的全生命周期定义较为客观完善, 他指出“建模仿真全生命周期是过程、工作产品、质量保证活动和工程管理活动的组织框架, 用来开发、使用、维护和重用 M&S 应用”。全生命周期不仅仅是一个流程图或者图表, 而应该是一个框架, 它不仅面向开发者, 还要对组织者、管理人员等人员给出相应的指导。

而关于模型重用这一活动的全生命周期的研究很少, 有学者研究模型重用的一般过程 [13], 有学者给出支持重用的建模仿真框架 [69], 也有学者从建模仿真不同层级、不同阶段的角度给出模型重用过程 [70]。但是目前还没有研究从模型重用整个全生命周期角度明确给出其整个过程、管理及质量保证活动的过程模型及框架。

5.1.2 成本效益模型

成本效益模型是指仿真模型在经过完整的中用过程后, 如何计算复杂系统仿真应用开发所需成本和效益的模型或方法. Pidd 等^[17] 早期就给出过关于软件重用成本效益的 CANK 模型, 但这个模型过于简单, 并没有考虑到实际复杂情况. 一般来说, 选取一个合适的开发和重用策略, 才能获取有效的收益. 这就要求我们设计一个成熟的成本效益模型来评估这个过程, 选择一个较好的重用框架和策略, 以达到获取收益的目的. 经过调研发现, 由于对模型重用过程没有统一的知识体系及过程标准, 存在边界模糊, 定量计算困难等问题, 没有学者研究并给出成熟的模型重用成本效益模型.

5.1.3 模型开发的能力成熟度模型

建立软件的能力成熟度模型的目的是帮助软件企业管理和改进软件工程过程, 增强开发与改进能力. 与软件能力成熟度模型类似, 模型开发过程也应该有它自己的能力成熟度指标, 作为模型重用、共享和组合时的一个重要的衡量指标, 同时模型开发的能力成熟度也是各仿真领域组织开发构建和管理高可信、高质量模型的重要参考.

模型开发过程的能力成熟度模型是关于模型开发流程的规范性和标准性, 从开发过程出发建立成熟的可重用模型的开发流程, 指导相关组织和人员对模型开发过程的管理与改进. 具体包括: (a) 比较其与软件能力成熟度模型的异同, 建立可重用模型开发过程的评估与度量指标; (b) 建立模型开发的能力成熟度模型的评估系统; (c) 优化可重用模型的开发过程; (d) 量化可重用模型开发过程的风险分析和控制; (e) 给出可重用模型开发的能力成熟度等级指标.

5.1.4 模型的成熟度

模型成熟度是指模型本身的成熟使用程度. 模型在使用与演化过程中被不断完善、修正, 模型的成熟度将逐步提升. 模型的成熟度越高表明该模型是被使用越多, 越被信赖的高可信高质量模型. 尤其在模型重用过程中, 成熟度高的模型被选择的优先级要远远高于新开发的或者“未成熟”的模型. 模型的成熟度是模型重用时考虑的重要指标. 由于模型的多样性、异构性、不同的应用需求, 以及模型使用者对模型本身的了解、使用效果等因素, 很难对模型的成熟度建立一个准确的、标准的定义, 因此很需要深入研究并给出其量化方法. 目前, 还没有比较规范的模型成熟度定义及说明规范, 关于模型的成熟度模型的研究也处于起步阶段. 具体包括: (a) 按照使用与应用需求的记录, 建立模型本身的质量评估与度量指标; (b) 构建关于模型的成熟度模型的评估体系; (c) 量化模型的成熟度; (d) 给出模型的成熟度等级指标.

5.1.5 可重用模型的判定依据

模型可重用判定研究主要解决两个问题: 一是为模型的可重用判断提供足够的描述信息; 二是对待重用模型进行可重用性判定与度量.

(1) 仿真模型描述. 仿真模型描述主要描述仿真模型的功能、输入输出等要素, 它是进行仿真模型可重用判断的前提与基础. 目前相关方法主要有基于框架的仿真模型描述^[24]、基于概念模型的仿真模型描述^[25]、基于模型假设的仿真模型描述^[30]和基于相关知识校验的仿真模型描述^[29]等. 基于框架的描述方法考虑跨领域的模型应用中应用情景的问题并将其分类, 按照分类框架判断模型是否能够重用, 此外依据其描述目标、假设和约束 (OAC) 框架信息来判断, 但是这些描述本身来说就有很强的挑战性, 很难实施. 基于模型假设的描述方法考虑模型假设之间的依赖关系, 识别逻辑冲突和语义冲

突,但是语义冲突识别方面有较强的专业性,该方法不是一个较为通用的方法.基于知识有效校验的描述方法考虑模型重用后其有效性校验的问题并以相关知识(VRK)的形式描述出来,虽然有判定依据但是判定并不是重用之前进行的,因此效率不高.基于概念模型的描述方法避免仿真模型与仿真器和实现方法相绑定,但是识别应用情景约束较为困难,且当需求变化或系统设计改变时,维护这种约束也比较困难.以上方法各有利弊,寻找一种支持多领域的、规范化的模型描述方法仍然是现今研究的难点和亟需解决的问题.

(2) 可重用性度量.可重用性度量是对应用情景变化时模型能够继续使用的能力的判断^[15].主要有以下几方面:(a)从代码、函数、组件和整体模型等4个层次对模型可重用判断进行分解^[11],基于这4个层次,对模型重用的复杂度和频率进行分析和判断;(b)从解决仿真模型可重用判定涉及的不同种类问题^[26]进行判断;(c)从抽象程度、重用粒度和组织层次3方面判断模型的可重用性^[17];(d)构造一个关于可重用性的形式化概念体系,在此基础上给出一个规范化的决策算法^[8].

已有的关于仿真模型可重用性判断的研究虽然提供了一些理论基础,但仍然面临一些问题:一是缺乏明确的、成熟的、可指导的模型重用判定的概念框架;二是缺乏对仿真模型可重用判断相关概念以及可重用判断本身的形式化研究;三是缺乏规范化的、有效的仿真模型描述的方法;四是在构建新的仿真应用系统时,缺乏快速、准确地判断仿真模型是否满足仿真系统需求的方法;五是缺乏量化的仿真模型“可重用能力/可重用度(degree of reusability)”的有效计算方法.前面介绍了一些已有模型描述与可重用判定方法,但为了方便判断,对模型设计人员来说,在设计构建模型时应考虑如下方面可以提高其可重用性:(a)提高应用情景接口的包容性;(b)提高模型的可移植性;(c)提高应用情景信息的可利用性;(d)建立更高层次的概念模型并形式化.

(3) 概念框架.研究模型重用的基础理论架构或概念框架,可有助于引导模型重用的开发和实现,诸如:面向模型可重用判定的概念框架、面向重用的建模仿真概念框架等,下面详细介绍面向重用的建模仿真概念框架.建模仿真概念框架描述了建模仿真活动的实体及其相互关系.它的基本实体包括源系统、实验框架、模型和仿真器,实体之间的主要关系包括建模关系、仿真关系^[71].当面对新的仿真应用需求,经典建模仿真存在缺陷,即使勉强重用也难以实现有效互操作.要支持重用,必须采用面向重用的建模仿真概念框架.面向重用的概念框架有很多^[8,64,72],本文总结相关研究并给出一个通用的面向重用的建模仿真概念框架,如图6所示.

面向重用的建模仿真概念框架的基本实体包括源系统、实验框架、仿真概念模型、仿真实现模型、概念模型集、实现模型集和仿真器,基本实体之间的主要关系包括建模关系、仿真关系、重用关系、实现关系、约束依赖关系5类.相比于经典的建模仿真概念框架,其改进之处如下:(a)仿真模型分为仿真概念模型和仿真实现模型;(b)增加了模型库实体;(c)增加了应用情景.

5.1.6 应用模式

应用模式是如何利用模型重用技术给相关人员或者组织带来有效利益,这也是模型重用研究问题的瓶颈之一.在面向服务仿真及云仿真环境下,以云和服务为中心的模型重用的重点是共享,而由于模型开发者或者拥有者的利益不能得到有效保障或者在模型重用过程中利益分配不均,导致他们不愿共享出这些模型以供其他人员或者机构使用,所以要借鉴经济管理领域的商业模式来解决这个矛盾,进一步挖掘模型重用及仿真的商业运行模式,来保障拥有者和使用者的利益.具体研究问题有如下几点:(a)模型共享重用与利益转化的商业模式研究;(b)模型重用的B2B, C2C, B2C等商业模式研究;(c)基于区块链的模型版权保护研究;(d)模型重用商业模式的仿真研究.

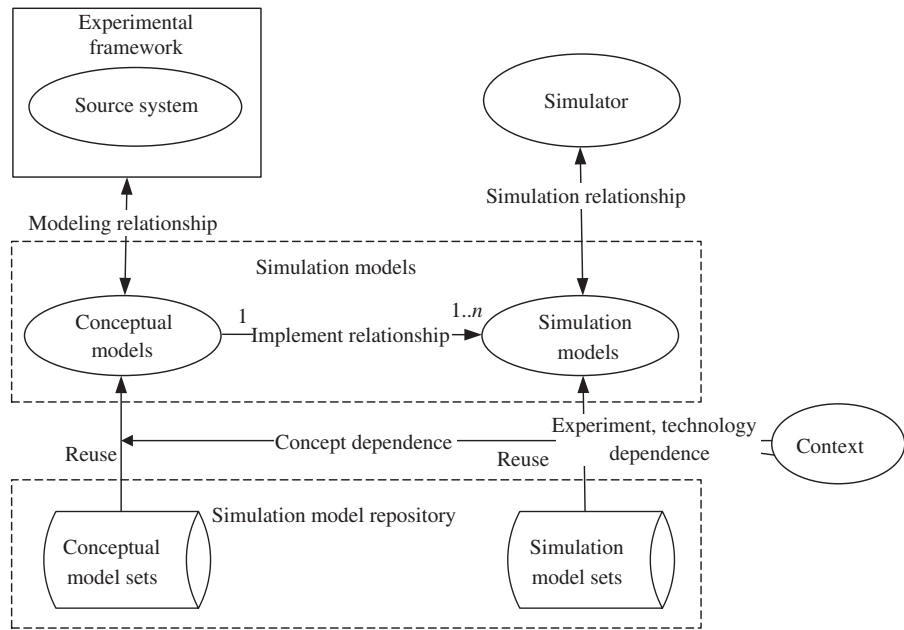


图 6 面向重用的建模仿真概念框架

Figure 6 The reuse-oriented modeling and simulation concept framework

5.1.7 模型可信度量化评估

模型可信是基于仿真系统对真实世界复杂对象或系统实现正确的观察、分析与控制的保证,也是模型重用的前提与基础,而在模型跨领域重用及多模型组件组合仿真情况下,模型是否在新的领域约束、新的交互特性及新的仿真环境下可信,以及如何保证模型在重用时的全生命周期过程中的可信性,是模型能否实现有效重用的基本问题.尤其在网络互联的大仿真环境下,迫切需要探索研究针对多领域互联环境下模型重用过程的可信度量化评估与优化方法.相关研究的问题包含: (a) 模型重用的可信度评估过程模型; (b) 重用模型的动态智能评估方法; (c) 面向高可信动态组合仿真的模型校准与优化方法; (d) 基于区块链技术的模型可信评估.

5.2 支撑技术

5.2.1 模型重用的协议标准

模型的规范化、标准化技术为模型表示规定了统一的内容、结构和行为.模型规范的标准化的不限制模型的实现技术,也不限定具体的仿真框架,同时也使得建立公共模型库时包含对重用关键的应用情景信息 [8]. 目前已有的标准和规范有如下: 基于任务空间概念模型 (CMMS) 的实体、活动、任务、交互 (entity, actions, tasks, interactions, EATI) 规范、美国国防部 (DoD) 推出的高层体系结构 (high level architecture, HLA)、基本对象模型 (basic object model, BOM)、欧洲航天局 (ESA) 推出的仿真模型可移植性标准 SMP 和 SMP2 等. 下面简单概述以上几个相关标准.

EATI. 任务空间概念模型 CMMS 采用了面向实体的系统分析方法 EATI 的思想 [73], 使之成为 CMMS 的规范, 为仿真模型概念层次的重用提供基础.

HLA. HLA 是 1995 年由美国国防部发布的建模仿真主计划中的核心技术框架, 并在 1996 年完成

基础定义,随后为北约各国所采纳,于2000年被IEEE接受并标准化^[74,75].之后在2010年被IEEE修订并升级到IEEE Std1516.2-2010^[43,76].HLA标准考虑的是HLA联邦成员(federate)层次上的重用.

BOM.为了解决HLA中FOM约束而导致的限制模型重用和互操作的实现问题,1997年SISO提出了基本对象模型BOM的概念,并于2005年推出了BOM的相关标准^[77,78].与HLA从系统的层次上来提高建模与仿真的重用性和互操作性相比,BOM是从模型层次上提高建模与仿真的重用性和互操作性;与FOM或SOM相比,BOM更侧重于仿真模型组件的重用和互操作^[79].

SMP/SMP2.90年代中期SMP规范在ESA内得到广泛应用,2004年欧洲航天局借鉴MDA思想,又提出了仿真模型可移植性规范SMP2.SMP通过制定标准化的仿真模型与平台之间的仿真协议,提高仿真模型本身的独立性,来实现仿真模型的可移植性重用.SMP2则考虑了仿真模型的语言无关性、平台无关性及概念层可重用等问题,全面支持仿真模型的可重用.

5.2.2 模型重用的支撑工具

仿真系统开发过程中的建模仿真环境或仿真工具都一定程度上支持模型重用,一般来说,重用模型通常更容易.重用背后的思想是建模环境所提供的模型是通用的,并通过组合仿真开发环境或模型开发包中的模型来重用,较少改变模型本身.例如COTS仿真开发包、CORBA, Simulink, OneSAF, MS4 Me^[80]等.目前,以抽象度最高的DEVS建模语言为基础的MS4 Me工具是针对多领域模型重用有效的支撑工具^[81],通过DEVS联盟的系统实体结构/模型库(SES/MB^[82])对组合模型进行SES, PES操作,实现复杂系统的模型组合及仿真.总体来说,由于仿真模型与仿真环境紧密耦合,在领域内采用统一的建模仿真环境存在如下问题:(a)不支持领域内多系统多层次的模型描述;(b)难以融入其他系统的模型;(c)可移植性较差、可维护性较差等问题.

5.2.3 模型的安全管理

现今,把大量的仿真资源应用在云架构环境下共享和重用已经成为提高仿真效率和提高模型质量的重要途径,但与此同时模型可信性会受到来自网络安全、管理等方面的威胁与挑战.因此,提高云环境下模型重用过程的安全性,建立完善的安全措施和管理制度是保证模型重用可信的关键.相关研究的问题主要包含:(a)模型重用过程的安全性、完整性保证;(b)数据的安全性、完整性保证;(c)云架构环境下可重用模型库的安全管理;(d)可重用模型的安全性评测;(e)仿真运行安全和接口安全性.

5.2.4 重用过程的可视化技术

可视化技术可应用在模型重用的全生命周期的各个阶段,不仅可以使可重用模型的开发、运行和管理过程更加明确、透明,也使得建模仿真的参与人员便于理解和工作的协调统一,同时能监控重用过程,为模型重用过程的维护和管理提供最直接的参考.如今,随着VR, AR等可视化虚拟化技术的快速发展,给模型重用研究带来了新的机遇和挑战;如何把它们与模型重用过程相结合,提高可视化的维度与直观性是未来研究的热点问题.具体研究问题主要包含:(a)模型重用过程可视化;(b)应用情景可视化;(c)模型组合可视化;(d)数据可视化.

5.2.5 模型重用中的数据处理

大数据技术可以为仿真结果分析提供更好的手段,有助于实现智能仿真;它扩展了数据挖掘和数

据耕耘的方法, 允许进行更大规模的仿真与模拟. 把大数据技术与模型重用结合起来可以给复杂系统的模型重用提供新的出路, 有利于可重用模型的发现和组合, 提供更高效的模型重用服务.

在仿真互操作、仿真组件 (仿真系统、仿真模型) 组合等模型重用的过程中需要进行大量的数据交换、数据共享等操作, 如泛化重用中的参数化数据, 仿真重用互操作中的交互数据, 可重用模型库中的模型数据, 仿真可移植中的配置数据等. 尤其随着大数据时代到来, 给模型重用过程中的数据带来了机遇和挑战^[83,84], 主要表现在数据管理、数据分析和数据共享 3 方面.

数据管理. 数据管理实践主要涉及数据的存储、识别、组织、校准、验证. 目前, 很多建模仿真的数据结构来自于平面文件到多格式的关系/分层数据库, 甚至更广泛的来源. 每个仿真事件的数据结构是唯一的且不包含云数据描述, 使得事件之间的数据比较很困难. 大数据技术使我们可以处理很多原始数据, 这放大了在元数据识别、组织和验证中更多鲁棒性的机会, 也产生了分析和共享数据重用组件的数据模型. 有效的数据管理实践可以促进数据重用, 数据完整性、复杂性分析是数据科学的基础.

数据分析. 探索性、推理性和预测性数据分析是用于建模和仿真的 3 个主要分析主体. 用于仿真的探索性数据分析中, 目标是描述数据并解释过去的行为, 例如人口普查数据及满足条件事件发生次数. 用于仿真的推理数据分析中, 目标是对基于有限数量仿真事件的行为做推理, 例如轮询和故障率分析. 用于仿真的预测数据分析中, 目标是使用之前收集的数据预测一个新事件的结果, 例如信用评分、行为预测和搜索结果. 大数据技术可以提高这 3 方面的数据分析, 并为数据重用提供基础.

数据共享. 尽管在任何设置中的数据总是担心被破坏, 但是更值得担心的是数据共享模式中的数据隐私和完整性. 即使在一个安全的共享环境中, 数据生产者也担心仿真数据没有在适合的范围内被使用. 此外, 数据生产者也会担心任何对数据重用都会造成原始数据的更改, 破坏数据的完整性. 因此, 安全性是数据共享模式下需要考虑的问题. 数据安全和隐私需要被视为风险管理流程的一部分, 允许持续评估, 确保提供适当的保护措施以防止不正确的数据收集、保留或使用.

5.3 模型重用关键实现技术研究

5.3.1 支持重用的模型表示

仿真模型表示是对仿真模型的表达方式和存储方式, 它面向包括建模仿真参与人员的每个角色, 并提供一致的模型内容. 仿真模型表示方法经历了大致 3 个阶段: (a) 程序设计语言表示; (b) 仿真语言表示; (c) 通用建模语言表示. 早期的仿真模型开发大多基于程序设计语言如 FORTRAN, C, C++ 等, 虽然它有较强通用性, 但它的抽象层次较低、建模难度高. 仿真语言则是针对特定领域的建模原语, 面向的是某一仿真领域, 如面向离散事件系统仿真的 GPSS 语言、面向连续系统仿真的 CSSL 语言、面向网络系统仿真的 SLAM、面向多领域物理仿真的 Modelica^[85] 语言等. 仿真语言表示方法虽然提高了抽象性, 但它仅面向单一领域, 在面向多领域仿真协同时存在不足. 通用建模语言是在面向对象思想指导下, 支持建模人员以与实现无关的方式建立系统模型. 例如基于 UML 的仿真模型定义语言 SMDL、用于模型存储的可扩展标记语言 XML、基于 XML 的 Schema 机制的 SRML 和 SML 语言、基于元模型的模型表示语言、标准系统建模语言 SysML^[86]、基于 DEVS 的模型表示方法^[87,88] 等, 都具有较强的通用性和可扩展性.

5.3.2 基于服务/云的模型重用

随着面向服务的架构 SOA 与建模仿真领域的结合与发展, 面向服务的建模仿真技术在很大程度提

供了解决 DIS, HLA 等架构在系统的可扩展性、互操作性和可重用性等方面表现较差的有效途径. 近年来, 国内外主要从面向服务的仿真框架、组合建模方法等方面来进行模型重用的研究^[89~91], 如: 面向服务的语义可组合仿真关键技术、基于面向服务架构的组合仿真方法、基于面向服务架构的模型可移植性规范建模仿真框架等. 在架构方面又可从以下几方面分类研究: (1) HLA/SOA 方面^[92~95], 基于开放网格服务体系的 HLA、G-DEVS/HLA 方法、WE-RTI、面向服务的 HLA 标准规范等; (2) DEVS/SOA 方面^[96~99], RT-DEVS、面向服务的 DEVS 框架、动态可调整服务模型组成方法、PowerDEVS 等; (3) MDA/SOA 方面^[100,101], 实时模型变换 MTBE、示范型模型变换等; (4) 云仿真/SOA 方面^[70,102,103], 云仿真架构、云仿真工具、云仿真实现方法等. 面向服务的模型重用技术结合 Web Service、云计算、云存储等架构下的服务模式, 可以快速提供可重用仿真模型并保证模型质量, 大大提高了建模仿真的效率.

随着云计算技术的发展, 面向服务技术与云架构更好地融合在一起, 云环境提供了更好的平台与资源整合能力, 云计算架构与建模仿真相结合, 让建模仿真以服务的形式提供更大范围的共享和重用的技术逐渐成为仿真领域学术界关注的热点. 基于此, 文献^[104,105]提出了建模仿真即服务 (modeling and simulation as a service, MSaaS) 的概念并指出基于云计算框架的仿真服务也可以具有云的按需分配资源、高速网络、快速响应等优点. 这些特点都为模型重用在云环境下的应用提供了很好的支撑. 国外方面, 基于云的建模与仿真的概念早就已经提出^[106], 文献^[107]指出了建立基于云服务的建模与仿真方法的必要性和必要性, 文献^[108]提出了一个基于云的仿真服务框架, 文献^[109]指出了建模与仿真作为云服务在云中的部署方式. 在 MSaaS 的研究方面, Siegfried 等^[110]根据对 NATO 发布的 MSG-131^[111] 文档的解读给出了 MSaaS 作为一种商业模型的期待与挑战; Wainer 等^[112,113]将 MSaaS 架构与 Mashup 技术结合给出了新的架构 MAMSAAS 用于快速开发仿真应用. 国内方面, 将云计算与仿真相结合的理念甚至早于欧美国家, Li 等^[114]于 2009 年提出云仿真的思想, 并面向航天产品的研制开发了云仿真平台 CloudSME (cloud simulation for manufacturing and engineering). 已有中国航天科工集团第二研究院、北京航空航天大学、清华大学、中国人民解放军国防科技大学等高校和院所相继开展了云仿真和 MSaaS 方面的研究, 取得了一批研究成果^[109,115,116].

目前关于 MSaaS 研究需要重点关注的研究点如下: (1) 基于 DEVS 的 MSaaS 分布建模框架; (2) 基于云的建模与仿真的重要性和必要性; (3) 如何快速创建复杂的、现实的、可伸缩的系统网络和组件之间的关联关系等方面的问题. 基于云的模型重用方法为实现模型重用提供了新的思路, 但目前的研究仍然缺少把云计算、面向服务的架构结合到多学科、跨领域、多粒度的仿真模型高可信重用方面的工作, 因此还需深入研究.

5.3.3 基于概念模型的模型重用

概念模型是对应用系统的第 1 层抽象, 其呈现的高度抽象性使模型更方便重用于新的应用系统中, 尤其对复杂系统的模型重用来说概念模型重用是非常有效的方法. 概念模型重用之前首先对系统进行概念建模, 其次要把概念模型转化成仿真模型, 之后对概念模型进行 V&V (verification & validation) 验证, 最后还要保证概念模型的互操作性, 在此基础上再对概念模型进行重用, 相关研究有^[117~122]: 概念建模、概念模型转换、概念模型 V&V、概念互操作模型、概念模型实现重用框架等.

5.3.4 实现重用的自动化

在人工智能和大数据等新兴技术的引领下, 模型的自动化重用也是需要重点研究的一个方向. 支

表 1 模型重用关键技术比较
Table 1 Model reuse key technology comparison

Reuse methods	Standards	Foucs on	Technical features	Portability	Reusable level	Reuse phase	Reuse-oriented modeling ideas
Reuse based on model standardization technology	HLA/BOM /SMP2 etc.	Unified model interface	Openful, standardi- zation	Well	Multi-level reuse	Design	Better
Reuse based on model representation technology	SRML/SML /SysML etc.	Unified model representation	Platform- independent, multi-domain support	Better	Multi-level reuse	Implement	General
Reuse of build- ing technology based on model- ing and simulat- ion environment	COTS /OneSAF etc.	Unified model interface	Internal model library	General	Single-level reuse	Execute	General
Reuse tech- nology based on conceptual model	Conceptual model standard system	Unified concep- tual modeling method	Generalization and abstraction	Well	Single-level reuse	Requirement or design	Well
Service-oriented model reuse	HLA/SOA DEVS/SOA etc.	Unified service ideas	Servitization	Better	Single-level reuse	Design or execute	Better
Cloud-based model reuse	MSaaS etc.	Unified concep- tual framework	Standardi- zation	General	Multi-level reuse	Implement or execute	Better

持自动重用操作的算法和框架研究主要涉及组合优选、组合验证等方面 [37], 相关研究的问题具体包含: (a) 能不能自动识别应用场景并实现模型选择、模型组合和代码生成过程; (b) 重用模式本身能不能以设计模式的方式被重用; (c) 模型组合的有效性能不能通过算法确认; (d) 能不能对模型开发过程进行约束以改进模型在第 1 次开发后的可组合性.

5.3.5 关键实现技术的比较分析

从技术特点、可移植性、可重用层次等方面给出了关键实现技术的比较, 如表 1 所示.

总体来看, 基于模型表示的重用统一了模型的表示语法, 降低了模型集成的复杂性, 但它并不关心模型的语义可重用问题, 针对仿真框架的开放性方面存在不足; 基于支持重用的建模与仿真环境的方法存在跨平台或环境的集成方面的不足; 基于概念模型实现模型重用的方法仍不成熟; 基于服务化与云的模型重用方法有很强的可行性, 但缺少相关标准.

虽然针对模型重用, 存在各式各样的仿真范式、建模语言及开发工具, 但是这些并未从根本上解决模型重用的问题. 究其原因, 一方面由于不同仿真框架兼容性较低, 其基本组件领域针对性较强, 模型难以重复使用; 另一方面不同框架之间独立性强, 框架之间互操作性、可组合性, 以及可扩展性均较低, 在多学科建模和多系统体系构建时, 通常需要工程人员对模型进行二次开发, 实现跨领域模型的组合与集成, 进而又提高了仿真模型的复杂度及使用门槛. 此外, 在仿真模型重用应用中的共享和扩展协同方面, 虽然以基于云计算和服务化技术为代表, 标准化和统一管理优势使模型重用更加便利与优化, 然而这些都仅仅回答了单一层次结构下的模型重用和协同交互问题, 针对多粒度模型如何实

现高可信、跨领域重用,如何提高模型在重用过程中可扩展性等问题仍未得到很好解答.

在复杂系统仿真中,模型重用的这些问题尤为突出;同时,针对复杂系统模型重用的标准化、规范化的研究仍较少,可重用性判定、模型验证与评估等基础理论研究还比较薄弱,且尚未形成关于复杂系统模型重用的成熟研究体系.当前 MSaaS 为复杂系统模型重用研究提供了新思路,而国内外针对云架构下的复杂系统模型重用方面的研究仍旧十分匮乏,亟需研究其相关的基础理论体系、重用模式与机制、重用方法等,给复杂系统仿真的高可信模型重用提供有力的理论与方法支撑.

6 总结与展望

为了更好地开展模型重用技术及其在复杂仿真系统下的相关研究,探索其在网络化、服务化、云仿真等新仿真环境下的全生命周期管理和工程化实施,本文对模型重用的问题进行了概述,给出了模型重用的相关概念,对模型重用研究现状进行了分析和论述.给出了模型重用的一个知识体系,分析了当前模型重用研究在基础理论、重用方法、概念框架等方面的存在不足,最后对未来研究工作进行了展望.通过对模型重用问题的研究总结,可以得到以下几点启示:

(1) 复杂系统仿真所研究对象的复杂性、多样性、多领域性,以及系统本身的复杂性等原因,使得面向仿真的模型重用在理论研究方面还不是很成熟,因此建立一个完善的、成熟的理论体系作为模型重用方法和技术的基础支撑和指导是当前亟需解决的问题.

(2) 随着云计算、大数据等新兴技术迅速发展,分布式的可扩展的支持重用的仿真建模框架与建模仿真资源的共享技术是建模仿真领域的未来研究方向,其中建模仿真即服务框架 MSaaS 采用基于服务的技术与云计算思想,对分散的模型与仿真资源进行整合,实现模型与仿真资源的基于网络的全面互联、全局共享和高效重用,以支持高度复杂和快速变化的仿真系统应用.

(3) 最后需要指出的是,仿真模型重用的研究是一项长期、复杂的工作,要以仿真系统涉及的各类模型为研究对象,在模型的整个全生命周期中提供标准化、规范化、系统化的理论、方法、技术和工具,并最终建立完善的模型重用的工程体系.

致谢 感谢北京航空航天大学宋晓,哈尔滨工业大学杨明、马萍、李伟,北京电子工程研究所施国强、林廷宇等,参与了本文相关内容的讨论并提出了许多宝贵意见.

参考文献

- 1 Fan W H, Wu J H. Development and future trend of computer simulation and quantum computer simulation. J Syst Simul, 2017, 29: 1161–1167 [范文慧, 吴佳惠. 计算机仿真发展现状及未来的量子计算机仿真. 系统仿真学报, 2017, 29: 1161–1167]
- 2 Liu X T. Simulation Science and Technology and Engineering. Beijing: Science Press, 2013 [刘兴堂. 仿真科学技术及工程. 北京: 科学出版社, 2013]
- 3 Jamshidi M. Introduction to System of Systems. Hoboken: John Wiley & Sons, 2015
- 4 Hu X F. War complexity and issues in the SoS simulation research. Mil Oper Res Syst Eng, 2010, 24: 27–34 [胡晓峰. 战争复杂性与复杂体系仿真问题. 军事运筹与系统工程, 2010, 24: 27–34]
- 5 Jin W X, Xiao T Y. Simulation on evolutive behavior of system-of-systems (SoS) created for net-centric operations (NCO) based on complex system theory. J Syst Simul, 2010, 22: 2435–2445 [金伟新, 肖田元. 基于复杂系统理论的信息化战争体系对抗仿真. 系统仿真学报, 2010, 22: 2435–2445]

- 6 Xu G B, Zeng L Z. Development tendency of digital simulation. *Comput Simul*, 2013, 30: 1-3 [徐庚保, 曾莲芝. 数字仿真发展趋势. *计算机仿真*, 2013, 30: 1-3]
- 7 Fujimoto R, Bock C, Chen W, et al. *Research Challenges in Modeling & Simulation for Engineering Complex Systems*. Berlin: Springer, 2017
- 8 Lei Y L. Simulation model reuse theory and approaches with heterogeneous integration support. Dissertation for Ph.D. Degree. Changsha: National University of Defense Technology, 2006 [雷永林. 仿真模型重用理论、方法与异构集成技术研究. 博士学位论文. 长沙: 国防科学技术大学, 2006]
- 9 Overstreet C M, Nance R E, Balci O. Issues in enhancing model reuse. 2002. <https://pdfs.semanticscholar.org/6473/3f3741c39579e84cfbba41bd873e665db07e.pdf>
- 10 Petty M D, Weisel E W. A formal basis for a theory of semantic composability. In: *Proceedings of the Spring Simulation Interoperability Workshop*, Orlando, 2003
- 11 Pidd M. Simulation software and model reuse: a polemic. In: *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, San Diego, 2002
- 12 Liang Y Z, Zhang W S, Kang X Y, et al. A survey of model reuse methods. *J Comput Simul*, 2008, 25: 1-5 [梁义芝, 张维石, 康晓予, 等. 仿真模型重用方法综述. *计算机仿真*, 2008, 25: 1-5]
- 13 Ma Q F, Zhang W M, Xu H H. Research on technologies of simulation model reuse. In: *Proceedings of Image Graphics Technology and Application Conference*, Beijing, 2008 [马全峰, 张文明, 徐豪华. 仿真模型重用技术研究. 见: 图像图形技术与应用学术会议, 北京, 2008]
- 14 Balci O, Arthur J D, Ormsby W F. Achieving reusability and composability with a simulation conceptual model. *J Simul*, 2011, 5: 157-165
- 15 Li W H, Li M, Zhao P, et al. Reusability assessment of simulation conceptual model. *J Command Control Simul*, 2012, 34: 92-96 [李文豪, 李密, 赵鹏, 等. 仿真概念模型可重用性评估. *指挥控制与仿真*, 2012, 34: 92-96]
- 16 Petty M D. *Verification, Validation and Accreditation*. Hoboken: John Wiley & Sons, 2010
- 17 Robinson S, Nance R E, Paul R J, et al. Simulation model reuse: definitions, benefits and obstacles. *Simul Model Pract Theory*, 2004, 12: 479-494
- 18 Keswani R, Joshi S, Jatain A. Software reuse in practice. In: *Proceedings of the 4th International Conference on Advanced Computing & Communication Technologies*, Rohtak, 2014. 159-162
- 19 Ören T I, Zeigler B P. Concepts for advanced simulation methodologies. *Simulation*, 1979, 32: 69-82
- 20 Huhn R, Mensh D R, Nance R, et al. Issues in simulation model integration, reusability and adaptability. In: *Proceedings of the 18th Conference on Winter Simulation*, Washington, 1986
- 21 Zuo D L. Research on resource reuse technology in virtual simulation. Dissertation for Master Degree. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2008 [左大利. 虚拟仿真中资源重用技术研究. 硕士学位论文. 广州: 广东工业大学, 2008]
- 22 Morse K L. Data and metadata requirements for composable mission space environments. In: *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, Washington, 2004. 271-278
- 23 Saulnier E T, Bortscheller B J. Simulation model reusability. *IEEE Commun Mag*, 1994, 32: 64-69
- 24 Pos A, Borst P, Top J, et al. Reusability of simulation models. *Knowl-Based Syst*, 1996, 9: 119-125
- 25 Pace D K. Simulation conceptual model development issues and implications for reuse of simulation components. In: *Proceedings of the 2000 Fall Simulation Conference*, Orlando, 2000
- 26 Petty M D, Weisel E W, Mielke R R. Computational complexity of selecting components for composition. In: *Proceedings of the Fall Simulation Interoperability Workshop*, Orlando, 2003. 14-19
- 27 Tolk A, Muguira J A. The levels of conceptual interoperability model. In: *Proceedings of the Fall Simulation Interoperability Workshop*, Orlando, 2003. 127-130
- 28 Yilmaz L. On the need for contextualized introspective models to improve reuse and composability of defense simulations. *J Defense Model Simul*, 2004, 1: 141-151
- 29 Malak R J J, Paredis C J J. Foundations of validating reusable behavioral models in engineering design problems.

- In: Proceedings of the Winter Simulation Conference, Washington, 2004. 420–428
- 30 Hofmann M A. Modeling assumptions: how they affect validation and interoperability. In: Proceedings of the European Simulation Interoperability Workshop, Toulouse, 2005
- 31 Wang W P, Zhou D X, Li Q, et al. Multi-level framework for composable simulation based on mda. *J Syst Simul*, 2007, 19: 4358–4362 [王维平, 周东祥, 李群, 等. 基于 MDA 的多层次框架式组合建模仿真方法研究. *系统仿真学报*, 2007, 19: 4358–4362]
- 32 Bell D, Cesare S D, Lycett M, et al. A web services component discovery and deployment architecture for simulation model reuse. research areas. 2006. <https://bura.brunel.ac.uk/bitstream/2438/639/1/SISO%20SIM%20ONTO.pdf>
- 33 Zhang L. Model engineering for complex system simulation. In: *New Ideas, New Theories, Academic Salon Anthology 58: Puzzle and Thinking of Complex System Modeling and Simulation*, 2011 [张霖. 面向复杂系统仿真的模型工程. 见: *新观点新学说学术沙龙文集 58: 复杂系统建模仿真中的困惑和思考*, 2011]
- 34 Zeigler B P, Zhang L. Service-Oriented Model Engineering and Simulation for System of Systems Engineering, in *Concepts and Methodologies for Modeling and Simulation*. Berlin: Springer, 2015
- 35 Zhang L, Zhang X S, Song X, et al. Model engineering for complex system simulation. *J Syst Simul*, 2013, 25: 2719–2736
- 36 Tolk A, Mittal S. A necessary paradigm change to enable composable cloud-based M&S services. In: Proceedings of the Winter Simulation Conference, Savannah, 2014. 356–366
- 37 Fujimoto R M. Research challenges in parallel and distributed simulation. *ACM Trans Model Comput Simul*, 2016, 26: 1–29
- 38 Xiong S. Reusability implementation method of large-scale simulation model architecture. *J Modern Navigation*, 2016, 7: 131–136 [熊嵩. 大型仿真模型体系的可重用性实现方法研究. *现代导航*, 2016, 7: 131–136]
- 39 Bocciarelli P, D'Ambrogio A, Mastromattei A, et al. Automated development of web-based modeling services for MSaaS platforms. In: Proceedings of the Symposium on Model-driven Approaches for Simulation Engineering, Virginia Beach, 2017
- 40 Deng Y, Liu X Y. Research on microservice architecture modeling based on interactive flow modeling language. *Softw Guide*, 2018, 1: 165–168 [邓禹, 刘晓燕. 基于交互流建模语言的微服务架构建模研究. *软件导刊*, 2018, 1: 165–168]
- 41 Hawryszkiewicz I T. A meta model for modeling collaborative systems. *J Comput Inf Syst*, 2016, 45: 63–72
- 42 Wang J, Beu J, Yalamanchili S, et al. Designing configurable, modifiable and reusable components for simulation of multicore systems. In: Proceedings of High Performance Computing, Networking, Storage & Analysis, Salt Lake City, 2013. 472–476
- 43 Scrudder R, Saunders R, Möller B, et al. IEEE Standard for Modeling and Simulation (M&S) High Level Architecture (HLA) — Federate Interface Specification. IEEE Std 1516.1-2000, 2010
- 44 Peng G Z, Mao H C, Wang H W, et al. BOM-based design knowledge representation and reasoning for collaborative product development. *J Syst Sci Syst Eng*, 2016, 25: 159–176
- 45 Pan Q H, Zhang H J, Zhang T F. Study on simulation modeling based on MDA & HLA. *J Syst Simul*, 2010, 22: 1169–1173 [潘庆华, 张宏军, 张铁夫. 基于 MDA 和 HLA 的仿真建模研究. *系统仿真学报*, 2010, 22: 1169–1173]
- 46 Nemeth S, Demarest P. Research and development in application of the simulation model portability standard. In: Proceedings of SpaceOps 2010 Conference Delivering on the Dream Hosted by NASA Marshall Space Flight Center and Organized by AIAA, Huntsville, 2010
- 47 Lei Y L, Su N L, Li J J, et al. New simulation model representation specification SMP2 and its key application techniques. *Syst Eng-Theory Pract*, 2010, 31: 553–572
- 48 Kalman M, Havasi F. Enhanced XML validation using SRML. *Int J Web Semant Technol*, 2013, 4: 1–18
- 49 Fritzson P A. Principles of Object-Oriented Modeling and Simulation with Modelica 3.3. Hoboken: John Wiley & Sons, 2014
- 50 Kilgore R A. Open source simulation modeling language (SML). In: Proceedings of the Winter Simulation Conference, Arlington, 2001. 607–613

- 51 Rosa W, Packard T, Krupanand A, et al. COTS integration and estimation for ERP. *J Syst Softw*, 2013, 86: 538–550
- 52 Whalen M W, Murugesan A, Rayadurgam S, et al. Structuring simulink models for verification and reuse. In: *Proceedings of the 6th International Workshop on Modeling in Software Engineering*, Hyderabad, 2014. 19–24
- 53 Bell D, de Cesare S, Lycett M, et al. Semantic web service architecture for simulation model reuse. In: *Proceedings of the 11th IEEE International Symposium on Distributed Simulation and Real-Time Applications*, Chania, 2007. 129–136
- 54 Tounsi I, Hrichi Z, Kacem M H, et al. Using SoaML models and Event-B specifications for modeling SOA design patterns. In: *Proceedings of the 15th International Conference on Enterprise Information Systems*, Angers, 2013. 294–301
- 55 Hu J P, Huang L P, Cao B, et al. Executable modeling approach to service oriented architecture using SoaML in conjunction with extended DEVSMML. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Services Computing*, Anchorage, 2014. 243–250
- 56 Wang S X, Wainer G. A mashup architecture with modeling and simulation as a service. In: *Proceedings of International Conference on Web Information Systems Engineering*, Miami, 2015
- 57 Hu Y, Xiao J, Zhao H, et al. DEVSMO: an ontology of DEVS model representation for model reuse. In: *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, Washington, 2013. 4002–4003
- 58 Ju R S, Yang M, Zhong R H, et al. Summary of service oriented modeling and simulation. *J Syst Eng Electron*, 2013, 35: 1539–1546 [鞠儒生, 杨妹, 钟荣华, 等. 面向服务的建模与仿真技术综述. *系统工程与电子技术*, 2013, 35: 1539–1546]
- 59 Guo X F. Research on key technologies of distributed simulation based on SOA and HLA. Dissertation for Ph.D. Degree. Zhengzhou: PLA Information Engineering University, 2011 [郭晓峰. 基于 SOA 和 HLA 的分布式仿真关键技术研究. 博士学位论文. 郑州: 解放军信息工程大学, 2011]
- 60 Chen P. Research on UAV distributed cooperative simulation. Dissertation for Master Degree. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics, 2016 [陈朋. 无人机分布式协同仿真技术研究. 硕士学位论文. 南京: 南京航空航天大学, 2016]
- 61 Peng G Z, Mao H C, Zhang H M. BMRSS: BOM-based multi-resolution simulation system using components. In: *Proceedings of Asian Simulation Conference*, Singapore, 2013. 485–496
- 62 Zhao J C, Huang L P, Chen J Y, et al. Model reuse oriented simulation cloud service platform design and implementation. *J Graph*, 2017, 6: 857–864 [赵继丛, 黄利平, 陈俊宇, 等. 面向模型重用的仿真云服务平台设计与实现. *图学学报*, 2017, 6: 857–864]
- 63 Rao D H, Hu X F, Wu L. Research of model integration oriented framework for distributed DEVS/HLA simulation. In: *Proceedings of the 14th Chinese Conference on System Simulation Technology and Application*, Sanya, 2012 [饶德虎, 胡晓峰, 吴琳. 面向模型集成的 DEVS/HLA 仿真框架研究. 见: 第 14 届中国系统仿真技术及其应用学术年会, 三亚, 2012]
- 64 Kang X Y. Research on reuse and combination of key technologies of simulation models. Dissertation for Ph.D. Degree. Dalian: Dalian University of Technology, 2012 [康晓予. 仿真模型重用与组合关键技术研究. 博士学位论文. 大连: 大连理工大学, 2012]
- 65 Banks J, Carson J S, Nelson B L, et al. *Discrete Event System Simulation*. 5th ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2010
- 66 Barker M, Zupick N. Revisiting the four CS of managing a successful simulation project. In: *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, Las Vegas, 2017. 580–587
- 67 Balci O. Golden rules of verification, validation, testing, and certification of modeling and simulation applications. *SCS M&S Mag*, 2010, 4: 1–7
- 68 Balci O. A life cycle for modeling and simulation. *Simulation*, 2012, 88: 870–883
- 69 Li T, Li B H, Chai X D, et al. Meta modeling framework for complex product multidiscipline virtual prototyping. *J Comput Integr Manuf Syst*, 2011, 17: 1178–1186 [李潭, 李伯虎, 柴旭东等. 复杂产品多学科虚拟样机元建模框架.

- 计算机集成制造系统, 2011, 17: 1178–1186]
- 70 Li T, Li B H, Chai X D. Layered simulation service description framework oriented to cloud simulation. *J Comput Integr Manuf Syst*, 2012, 18: 2091–2098 [李潭, 李伯虎, 柴旭东. 面向云仿真的层次化仿真服务描述框架. 计算机集成制造系统, 2012, 18: 209–2098]
 - 71 Zeigler B P, Praehofer H, Kim T G. *Theory of Modeling and Simulation: Integrating Discrete Event and Continuous Complex Dynamic Systems*. San Diego: Academic Press, 2000
 - 72 Zeigler B P, Nutaro J J. Towards a framework for more robust validation and verification of simulation models for systems of systems. *J Defense Model Simul*, 2016, 13: 3–16
 - 73 Zhang X J, Xia H M, Xie G X, et al. Design and implementation of integrated tactical simulation system based on HLA. *J Syst Simul*, 2010, 22: 2241–2245 [张欣景, 夏红梅, 谢国新, 等. 基于 HLA 的作战模拟系统一体化设计与实现. 系统仿真学报, 2010, 22: 2241–2245]
 - 74 IEEE. IEEE Standard for Modeling and Simulation (M&S) High Level Architecture (HLA) — Framework and Rules. IEEE 1516-2000, 2000. <http://standards.ieee.org/findstds/standard/1516-2000.html>
 - 75 IEEE. IEEE Standard for Modeling and Simulation (M&S) High Level Architecture (HLA) — Object Model Template (OMT) Specification. IEEE Std 1516.2-2000, 2001. <http://standards.ieee.org/findstds/standard/1516.2-2000.html>
 - 76 IEEE. IEEE Standard for Modeling and Simulation (M&S) High Level Architecture (HLA) — Framework and Rules. IEEE Std 1516-2010, 2010. <http://standards.ieee.org/findstds/standard/1516-2010.html>
 - 77 Simulation Interoperability Standards Organization (SISO). Base Object Model (BOM) Template Specification. SISO-STD-003.1-DRAFT-V0.12, 2006. https://www.sisostds.org/DigitalLibrary.aspx?Command_CoreDownload&EntryId=30820
 - 78 Simulation Interoperability Standards Organization (SISO). Guide for Base Object Model (BOM) Use and Implementation. SISO-STD-003.1-2006, 2006. https://www.sisostds.org/DigitalLibrary.aspx?Command_CoreDownload&EntryId=30819
 - 79 Yi J, Ma Y P, Zhu B. Research on composition model description method based on BOM. In: *Proceedings of 2013 China Command and Control Conference*, Beijing, 2013 [易剑, 马亚平, 朱冰. 基于 BOM 的组合模型描述方法研究. 见: 2013 中国指挥控制大会, 北京, 2013]
 - 80 Van Tendeloo Y, Vangheluwe H. An evaluation of DEVS simulation tools. *Simulation*, 2017, 93: 103–121
 - 81 Zeigler B P, Sarjoughian H S, Duboz R, et al. *Guide to Modeling and Simulation of Systems of Systems*. Berlin: Springer, 2013
 - 82 Schmidt A, Durak U, Rasch C, et al. Model-based testing approach for MATLAB/simulink using system entity structure and experimental frames. In: *Proceedings of the Symposium on Theory of Modeling & Simulation: DEVS Integrative M&S Symposium*, Alexandria, 2015. 69–76
 - 83 Tolk A. The next generation of modeling & simulation: integrating big data and deep learning. In: *Proceedings of Conference on Summer Computer Simulation*, Chicago, 2015
 - 84 Balci O, Ball G L, Morse K L, et al. Model reuse, composition, and adaptation. In: *Research Challenges in Modeling and Simulation for Engineering Complex Systems*. Berlin: Springer, 2017
 - 85 Foster S, Thiele B, Cavalcanti A, et al. Towards a UTP semantics for modelica. In: *Proceedings of International Symposium on Unifying Theories of Programming*, Reykjavik, 2016. 44–64
 - 86 Friedenthal S, Moore A, Steiner R. A practical guide to SysML. *Jung Inst Libr J*, 2012, 17: 41–46
 - 87 Peng Y, Zhong R H, Huang J, et al. Semantic extended representation approach of DEVS model. *J Syst Simul*, 2010, 22: 2519–2523 [彭勇, 钟容华, 黄健, 等. 一种语义扩展的 DEVS 模型表示方法. 系统仿真学报, 2010, 22: 2519–2523]
 - 88 Seo C, Zeigler B P, Coop R, et al. DEVS modeling and simulation methodology with MS4 Me software tool. In: *Proceedings of the Symposium on Theory of Modeling & Simulation*, San Diego, 2014
 - 89 Shi Y, Dong H Q, Lu M H. Research on simulation composability and reusability based on SOA. *J Syst Simul*, 2014, 26: 1522–1526 [史扬, 董汉权, 陆铭华. 面向服务的可组合可重用仿真技术研究. 系统仿真学报, 2014, 26: 1522–1526]

- 1522–1526]
- 90 Cai Y. Service-oriented simulation supports key environmental technology research. Dissertation for Ph.D. Degree. Changsha: National University of Defense Technology, 2014 [蔡楹. 面向服务的仿真支持环境关键技术研究. 博士学位论文. 长沙: 国防科学技术大学, 2014]
- 91 Wang W P, Wang C, Li Q. Simulation model portability modeling and simulation framework based on service oriented architecture. *J Comput Integr Manuf Syst*, 2011, 17: 2723–2731 [王维平, 王超, 李群. 基于面向服务架构的模型可移植性规范建模仿真框架. 计算机集成制造系统, 2011, 17: 2723–2731]
- 92 Albagli A N, Falcão D M, de Rezende J F. Smart grid framework co-simulation using HLA architecture. *Electric Power Syst Res*, 2016, 130: 22–33
- 93 Ribault J, Zacharewicz G. Time-based orchestration of workflow, interoperability with G-Devs/Hla. *J Comput Sci*, 2015, 10: 126–136
- 94 Gao W Q, Kang F J, Zhong L J, et al. Cloud simulation technology based on HLA evolved. *J Syst Simul*, 2011, 23: 1643–1647 [高武奇, 康凤举, 钟联炯, 等. 一种基于 HLA evolved 的云仿真技术研究. 系统仿真学报, 2011, 23: 1643–1647]
- 95 Katherine D, Morse L, Tolk D A, et al. XMSF as an enabler for NATO M&S. In: *Proceedings of NATO Modeling and Simulation Group Conference*, Koblenz, 2004
- 96 Kim T, Seo C, Zeigler B P. Web-based distributed network analyzer using a system entity structure over a service-oriented architecture. *Simulation*, 2010, 86: 155–180
- 97 Seo C, Zeigler B P. Simulation model standardization through web services: interoperation and federation on the DEVS/SOA platform. In: *Proceedings of the Symposium on Theory of Modeling and Simulation*, Orlando, 2012
- 98 Muqsith M A, Sarjoughian H S, Huang D Z, et al. Simulating adaptive service-oriented software systems. *Simulation*, 2011, 87: 915–931
- 99 Bergero F, Kofman E. PowerDEVS: a tool for hybrid system modeling and real-time simulation. *Simulation*, 2011, 87: 113–132
- 100 Langer P. Adaptable model versioning based on model transformation by demonstration. Dissertation for Ph.D. Degree. Wien: Vienna University of Technology, 2011
- 101 Kappel G, Langer P, Retschitzegger W, et al. Model transformation by-example: a survey of the first wave. In: *Conceptual Modelling and its Theoretical Foundations*. Berlin: Springer, 2012. 197–215
- 102 Liu H B, Su H Y, Zhang Y B, et al. Study on virtualization-based simulation grid. In: *Proceedings of International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*, Changsha, 2010. 685–689
- 103 Gao W Q, Kang F J, Zhong L J, et al. Cloud simulation technology based on HLA evolved. *J Syst Simul*, 2011, 23: 1643–1647
- 104 Cayirci E. Modeling and simulation as a cloud service: a survey. In: *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, Washington, 2013. 389–400
- 105 Cayirci E. Configuration schemes for modeling and simulation as a service federation. *Simulation*, 2013, 89: 1388–1399
- 106 Calheiros R N, Ranjan R, de Rose C A F, et al. CloudSim: a novel framework for modeling and simulation of cloud computing infrastructures and services. *Comput Sci*, 2009. ArXiv:0903.2525
- 107 Taylor S J E, Khan A, Morse K L, et al. Grand challenges on the theory of modeling and simulation. In: *Proceedings of the Symposium on Theory of Modeling & Simulation-DEVS Integrative M&S Symposium*, San Diego, 2013
- 108 Onggo S, Taylor S, Tulegenov A. The need for cloud-based simulation from the perspective of simulation practitioners. In: *Proceedings of the 7th Operational Research Society Simulation Workshop*, Worcestershire, 2014
- 109 Bitterman T, Calyam P, Berryman A, et al. Simulation as a service (SMaaS): a cloud-based framework to support the educational use of scientific software. *Int J Cloud Comput*, 2014, 3: 177–190
- 110 Siegfried R, Tom V D B, Cramp A, et al. M&S as a service: expectations and challenges. In: *Proceedings of 2014 Fall Simulation Interoperability Workshops*, Orlando, 2014
- 111 NATO STO. Final Report of NATO MSG-131 “Modelling and Simulation as a Service: New Concepts and Service

- Oriented Architectures”. STO Technical Report STO-TR-MSG-131
- 112 Wang S X, Wainer G. A simulation as a service methodology with application for crowd modeling, simulation and visualization. *Simulation*, 2015, 91: 71–95
 - 113 Wainer G, Wang S X. MAMS: mashup architecture with modeling and simulation as a service. *J Comput Sci*, 2017, 21: 113–131
 - 114 Li B H, Chai X D, Hou B C, et al. Networked modeling & simulation platform based on concept of cloud computing cloud simulation platform. *J Syst Simul*, 2009, 21: 5292–5299 [李伯虎, 柴旭东, 侯宝存, 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”. *系统仿真学报*, 2009, 21: 5292–5299]
 - 115 Li B H, Chai X D, Zhang L, et al. New advances of the research on cloud simulation. In: *Advanced Methods, Techniques, and Applications in Modeling and Simulation*. Berlin: Springer, 2012. 144–163
 - 116 Li B H, Chai X D, Hou B, et al. Cloud simulation platform. In: *Proceedings of the 2009 Grand Challenges in Modeling & Simulation Conference, Istanbul*, 2009. 303–307
 - 117 Liu J J, Yu Y L, Zhang L, et al. An overview of conceptual model for simulation and its validation. *Procedia Eng*, 2011, 24: 152–158
 - 118 Ayadi M, Affonso R C, Cheutet V, et al. Conceptual model for management of digital factory simulation information. *Int J Simul Model*, 2013, 12: 107–119
 - 119 Gracia J, Liem J, Lozano E, et al. Semantic techniques for enabling knowledge reuse in conceptual modelling. In: *Proceedings of International Semantic Web Conference, Shanghai*, 2010. 82–97
 - 120 Robinson S. *Conceptual Modeling for Simulation*. Hoboken: John Wiley & Sons, 2010
 - 121 Fillottrani P R, Keet C M. Conceptual model interoperability: a metamodel-driven approach. In: *Proceedings of International Symposium on Rules and Rule Markup Languages for the Semantic Web, Prague*, 2014
 - 122 Seo K M, Hong W, Kim T G. Enhancing model composability and reusability for entity-level combat simulation: a conceptual modeling approach. *Simulation*, 2017, 93: 825–840

Study on model reuse for complex system simulation

Ying LIU^{1,2}, Lin ZHANG^{1,2*} & Yuanjun LAILI^{1,2}

1. *School of Automation Science & Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;*

2. *Engineering Research Center of Complex Product Advanced Manufacturing Systems, Ministry of Education, Beihang University, Beijing 100191, China*

* Corresponding author. E-mail: zhanglin@buaa.edu.cn

Abstract In the field of simulation science, model reuse is an important way to improve the efficiency of modeling and the credibility of models in complex systems. It is also a hotspot and difficulty in complex system simulation. In this study, the requirements, concepts, and characteristics are summarized; key research techniques for model reuse for simulation as well as the model reuse knowledge system are given. In addition, a detailed description from the perspective of theory, method, and application is described, and the current model reuse research institute is discussed. Finally, key issues to be studied in the future are indicated.

Keywords modeling and simulation, model reuse, credibility, complex system, model lifecycle



Ying LIU was born in 1987. He received the B.S. and M.S. degrees from Harbin Engineering University, China. He is a Ph.D. candidate in Beihang University. His research interests include simulation model reuse and model engineering.



Lin ZHANG was born in 1966 and is a professor at Beihang University. This author is a fellow of SCS, ASIASM, Executive Vice President of China Simulation Federation, and Council Member of the Chinese Association for Artificial Intelligence. Research interests include M&S of complex systems, model engineering, intelligent manufacturing, and cloud manufacturing.



Yuanjun LAILI was born in 1987, received the BS, MS, and Ph.D degrees from School of Automation Science and Electrical Engineering at Beihang University. She is currently an assistant professor in Beihang University. Her main research interests are in the areas of optimization in manufacturing systems and the modeling and simulation of complex systems.