

3-22-2022

Open Cloud Architecture Design for Complex Product Modeling and Simulation System

Guoqiang Shi

1.Beijing Simulation Center, Beijing 100854, China;2.State Key Laboratory of Intelligent Manufacturing System Technology, Beijing Institute of Electronic System Engineering, Beijing 100854, China; sunnyqiang737@163.com

Zewei Liu

1.Beijing Simulation Center, Beijing 100854, China;2.State Key Laboratory of Intelligent Manufacturing System Technology, Beijing Institute of Electronic System Engineering, Beijing 100854, China;

Tingyu Lin

1.Beijing Simulation Center, Beijing 100854, China;2.State Key Laboratory of Intelligent Manufacturing System Technology, Beijing Institute of Electronic System Engineering, Beijing 100854, China;

Zhao Xu

1.Beijing Simulation Center, Beijing 100854, China;2.State Key Laboratory of Intelligent Manufacturing System Technology, Beijing Institute of Electronic System Engineering, Beijing 100854, China;

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Invited Papers & Special Columns is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Open Cloud Architecture Design for Complex Product Modeling and Simulation System

Abstract

Abstract: Aiming at the problem that the complex product modeling and simulation system focuses on co-simulation of heterogeneous models and cannot realize the on-demand sharing and collaboration of simulation resources, *this paper proposes an open cloud architecture for complex product modeling and simulation systems, realized on-demand sharing and collaboration of cross-organizational simulation software and hardware resources, thereby supporting complex product system-wide, full-lifecycle, anytime, anywhere, real-time, coherent, and transparently requesting accessing and obtaining simulation services. The object-process methodology (OPM) is used to model and deduce the simulation interoperability of the system and the on-demand sharing and collaborative process of simulation resources.* Through the application example of the control system, the validity of the open cloud architecture design for the complex product modeling and simulation systems is verified.

Keywords

complex product modeling and simulation, open cloud architecture, heterogeneous platform, simulation interoperability, embedded simulation system, object-process methodology (OPM)

Authors

Guoqiang Shi, Zewei Liu, Tingyu Lin, Zhao Xu, Xingyi Yang, Liqin Guo, and Zhengxuan Jia

Recommended Citation

Guoqiang Shi, Zewei Liu, Tingyu Lin, Zhao Xu, Xingyi Yang, Liqin Guo, Zhengxuan Jia. Open Cloud Architecture Design for Complex Product Modeling and Simulation System[J]. Journal of System Simulation, 2022, 34(3): 442-451.

面向复杂产品建模与仿真系统的开放式云架构设计

施国强^{1,2}, 刘泽伟^{1,2}, 林廷宇^{1,2}, 徐钊^{1,2}, 杨星熠^{1,2}, 郭丽琴^{1,2}, 贾政轩^{1,2}

(1. 北京仿真中心, 北京 100854; 2. 北京电子工程总体研究所 复杂产品智能制造系统技术国家重点实验室, 北京 100854)

摘要: 针对复杂产品建模与仿真系统侧重于解决异构模型联合仿真, 无法实现仿真资源的按需共享、协同的问题, 提出了一种面向复杂产品建模仿真系统的开放式云架构, 实现跨组织仿真软件、硬件资源的按需共享、协同, 从而支持复杂产品全系统、全生命周期随时随地、实时、连贯、透明地请求、访问和获得仿真服务。并使用对象过程方法论对系统的仿真互操作及仿真资源的按需共享、协同过程进行建模和推演。通过控制系统的研制应用范例, 验证了面向复杂产品建模与仿真系统的开放式云架构设计的有效性。

关键词: 复杂产品建模仿真; 开放式云架构; 异构平台; 仿真互操作; 嵌入式仿真系统; 对象过程方法论

中图分类号: TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2022)03-0442-10

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.22-0120

Open Cloud Architecture Design for Complex Product Modeling and Simulation System

Shi Guoqiang^{1,2}, Liu Zewei^{1,2}, Lin Tingyu^{1,2}, Xu Zhao^{1,2}, Yang Xingyi^{1,2}, Guo Liqin^{1,2}, Jia Zhengxuan^{1,2}

(1. Beijing Simulation Center, Beijing 100854, China; 2. State Key Laboratory of Intelligent Manufacturing System Technology, Beijing Institute of Electronic System Engineering, Beijing 100854, China)

Abstract: Aiming at the problem that the complex product modeling and simulation system focuses on co-simulation of heterogeneous models and cannot realize the on-demand sharing and collaboration of simulation resources, this paper proposes an open cloud architecture for complex product modeling and simulation systems, realized on-demand sharing and collaboration of cross-organizational simulation software and hardware resources, thereby supporting complex product system-wide, full-lifecycle, anytime, anywhere, real-time, coherent, and transparently requesting accessing and obtaining simulation services. The object-process methodology (OPM) is used to model and deduce the simulation interoperability of the system and the on-demand sharing and collaborative process of simulation resources. Through the application example of the control system, the validity of the open cloud architecture design for the complex product modeling and simulation systems is verified.

Keywords: complex product modeling and simulation; open cloud architecture; heterogeneous platform; simulation interoperability; embedded simulation system; object-process methodology (OPM)

引言

当前, 新的科技革命与产业变革已经在全球展开, “智能+”时代正在快速到来。复杂产品作为国家战略、国民经济和国防安全重要支柱, 为

了适应新时代的需求与挑战, 其形态正在发生重要的变化, 它主要基于泛在网络, 将人、产品终端、边缘/云平台、数据、智能分析与执行系统充分连接与协同, 形成一种以用户为中心、人/信息

收稿日期: 2022-02-21 修回日期: 2022-03-02

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB17016)

第一作者: 施国强(1979-), 男, 博士, 研究员, 研究方向为复杂系统建模与仿真。Email: sunnyqiang737@163.com

(赛博)空间/物理空间无缝融合、支持在线/持续认知与优化的新型人工智能系统,极大地提高了创新、服务能力及市场竞争力。

面向新形态下复杂产品全系统及全生命周期活动中人、机、物、环境自主智能地感知、互联、协同、学习、认知、决策、控制与执行,需要以建模仿真理论与技术为基础,以计算机系统、物理效应设备及仿真器为工具,通过与新一代人工智能科学技术、新一代信息通信技术以及各应用领域新专业技术等3类技术进行深度融合,建立与被研究对象有效映射并与被研究对象集成运行的新型嵌入式仿真系统,从而实现高效、优质、节省、绿色、安全地研制和运营复杂产品。

与传统只运行在设计师桌面的数字仿真系统相比,新型嵌入式仿真系统需要适应云、边缘、端各类分布异构的基础设施环境,一方面可以在边缘、端上就近开展智能方案评估和预测,满足基于动态数据更新实时响应和调整的需求;另一方面可以在边缘、云上并行开展智能模型优化和训练,满足基于高性能算力加速获得最优解的需求^[1]。李伯虎院士团队较早提出了通过管理多中心资源用于在分布式基础架构上进行一致部署的方法^[2],并提出了将多实例自动调度到基于云仿真的环境进行优化的方法^[3]。然而,由于跨组织仿真资源缺乏互操作标准,仿真系统和基础设施之间不能完全解构,难以实现仿真系统轻便封装、一致部署、灵活构建^[4]。

本文基于开放式云架构,实现跨组织仿真资源的按需共享、协同,从而支持复杂产品全系统、全生命周期随时随地、实时、连贯、透明地请求、访问和获得仿真服务。本文概述了国内外的相关工作,提出了基于开放式云架构的仿真系统框架,描述了异构平台仿真互操作模型,给出了应用范例,进行了总结和展望。

1 相关工作

复杂产品建模与仿真技术涉及的仿真种类很

多,包括硬件在环仿真、软件在环仿真、人在环仿真、分布式仿真、异构模型仿真等等。对应的也发展了很多相关仿真技术。例如,1995年美国国防部提出了HLA(high level architecture),即高层体系结构^[5],HLA后来被广泛应用在分布式仿真、硬件在环仿真等等^[6],并正式成为了IEEE标准^[7]。FMI(functional mockup interface)标准诞生于汽车领域的建模仿真需求^[8],后来由于其良好的兼容性,也广泛应用于其他行业,FMI通过规定了模型、接口和信息数据的格式,使得异构平台的模型有了统一的标准实现联合仿真^[9-10]。

HLA和FMI虽然解决了异构模型的互操作问题,但不能满足仿真资源的按需共享、协同的新需求。2009年云仿真技术提出将仿真资源虚拟化,并利用云仿真平台对仿真资源动态管理的概念^[11]。但随着新型嵌入式仿真系统的发展,还需要动态管理云、边缘、端各类分布异构的基础设施环境,因此需要基于开放式云架构,实现云、边缘、端各类仿真资源虚拟化的统一标准^[12-13]。

2 基于OPM的开放云架构设计方法

2.1 OPM介绍

对象过程方法论(object-process methodology, OPM)是一种通用的基于模型的系统工程的方法论^[14]。OPM中最重要概念是对象和过程,过程影响、生成或者消费对象,对象可以拥有不同的状态,过程能够改变对象的当前状态。

OPM有5种结构关系,表示对象与对象,或者过程与过程的结构关系:①整体-部分关系,表示被连接的2个元素中,其中一个是另一个的组成部分;②一般-特殊关系,表示被连接的2个元素中,其中一个继承自另一个;③实体-属性关系,表示被连接的2个元素中,其中一个是另一个的属性;④类-实例关系,表示被连接的2个元素中,一个是类,另一个是该类的实例;⑤通用结构关系,1种自定义结构关系,建模人员通过该

连接的标签来表示该关系的自定义含义。

OPM 有 3 种过程连接：①使能连接，一端连接过程，一端连接对象(一般是该过程发生的执行者、需要的设施或必备的条件)，该对象是该过程发生必不可少的，且该对象不受该过程影响；②转换连接，一端连接过程，一端连接对象(一般是该过程发生时消费的物品、产生的物品或受影响的物品)；③事件连接，事件连接表示过程由内部事件或外部事件触发执行。

OPM 与 SysML(system modeling language) 都是国际系统工程协会推荐使用的基于模型的系统工程语言，且 OPM 在 2014 年成为国际标准化组织标准。OPM 除了具有和 SysML 类似的，一致性、支持动态推演等特点外，其相对于 SysML 语言来说本身最主要的不同之处是：OPM 用了更少的图表、符号、关系等来用于复杂产品架构设计。这使得 OPM 相对于 SysML 等语言在复杂产品架构设

计时具有了很多方面的优势：建模人员的学习成本更小；概念模型更易于理解；更便于利益相关方之间的交流^[15]。

2.2 基于 OPM 的开放云架构设计

2.2.1 开放式云架构的系统视图设计

基于开放云架构的复杂产品建模与仿真系统的系统视图主要包括界面层、协同层、工具层、引擎层、支撑层和资源层，各个模块在系统架构中处于不同层级，如图 1 所示。

(1) 资源层：主要包括了计算/存储/网络等的计算基础设施资源、第三方仿真工具软件资源、仿真模型资源、仿真算法资源和仿真数据资源。作为基于开放云架构的复杂产品建模与仿真系统的底层框架，资源层提供了各类硬件、软件资源的支撑，特别是在算力、存储、通信、建模、仿真、数据、算法等方面为整个建模仿真系统提供支撑。

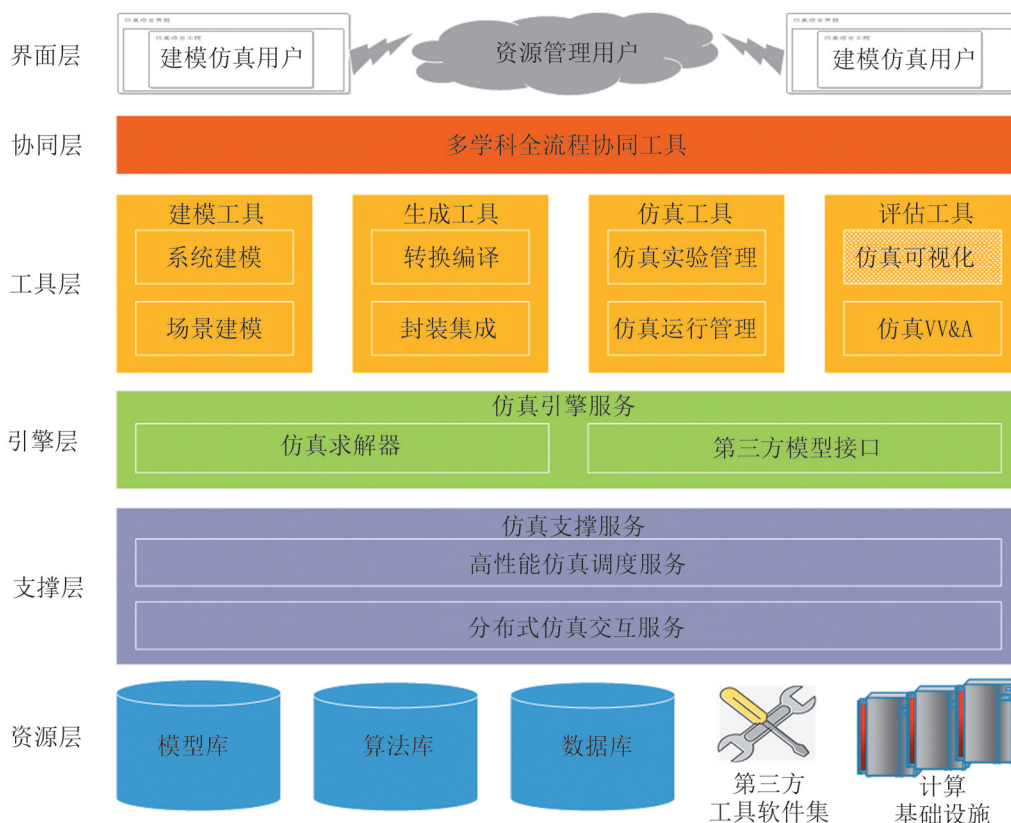


图 1 基于开放云架构的复杂产品建模与仿真系统的系统视图
Fig. 1 System view of complex product modeling and simulation system based on open cloud architecture

(2) 支撑层: 主要包括了高性能仿真调度服务和分布式仿真交互服务, 为整个建模仿真系统提供了仿真支撑服务。支撑层通过通信系统完成建模与仿真系统中云、边缘、端的互联, 实现资源的共享与访问。云、边缘、端连接包括异地分布式仿真和高性能集群分布式仿真2种方式。

(3) 引擎层: 引擎层包括仿真求解器和第三方模型接口。基于资源层的仿真系统提供了各类硬件、软件资源, 支撑层提供了异地分布式仿真和高性能集群分布式仿真支撑, 对各类仿真模型进行仿真求解, 并通过第三方模型接口支持第三方模型的求解运行。

(4) 工具层: 工具层主要包括: 建模工具、生成工具、仿真工具、评估工具4类, 基于各类资源池, 实现基础设施即服务(IaaS)/数据即服务(DaaS)、第三方接口服务(智能体/实装模拟器在回路)、仿真资源库管理服务、云仿真调度/协同中间件服务(PaaS)、仿真语言软件服务(SaaS)和仿真业务协同服务(CoaaS), 在仿真语言软件服务(SaaS)中实现模型解析转换服务、仿真试验管理服务、结果可视化服务、仿真运行管理服务、仿真评估分析服务、仿真代码调试服务、仿真求解引擎服务和图形/文本建模(含想定编辑)服务^[6-7]。

(5) 协同层: 协同层即多学科全流程协同工具。协同层将可能存储于不同节点的系统的软件、模

型、数据、算法等仿真资源以及各类计算资源连接为一个整体; 另一方面, 针对复杂产品建模与仿真, 涉及多用户协同操作, 需要多个节点共同完成任务, 因此也需要通过协同层连接为一个整体。

(6) 界面层: 界面层面向复杂产品建模与仿真系统的各类使用者, 通过社区门户实现各类系统的访问与功能的使用。

基于开放云架构的复杂产品建模与仿真系统的数据视图如图2所示, 由于仿真系统中存在种类多样的数据与服务, 基于开放云架构的复杂产品建模与仿真系统的仿真数据可能来自本地, 也可能来自云服务器。用户通过端建模仿真工具, 可以读取、记录本地的数据库, 以及读取、保存本地的模型或算法库, 也可以通过协同建模与仿真读取、保存云共享仓库中的模型或算法, 基于云仿真开展复杂仿真系统构建, 用户向云仿真系统提交各自的模型及运行环境需求。云仿真系统按需在计算能力不同(有的需要计算集群, 有的需要图形工作站)、操作系统不同(既有 Windows 也有 Linux)、工具软件不同的基础设施上动态地构建虚拟化的分布交互协同仿真环境。基于计算资源、存储资源、网络资源、软件资源的调度技术, 实现分布交互协同仿真环境的多实例化, 并将仿真运行的结果取回, 通过端建模仿真工具呈现给用户。

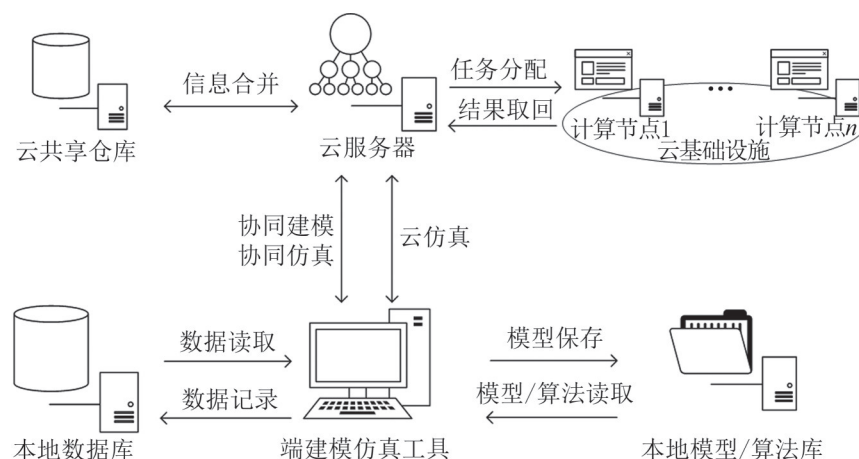


图2 基于开放云架构的复杂产品建模与仿真系统的数据视图

Fig. 2 Data view of complex product modeling and simulation system based on open cloud architecture

2.2.2 开放式云架构的操作视图设计

本文基于 OPM 语言，建立了如图 3 所示的异构平台仿真互操作模型。模型主要描述了基于开放式云架构实现复杂产品建模与仿真系统构建的参考过程。

通过此参考过程能够破除现有复杂产品建模与仿真系统在仿真互操作水平上的障碍，包括业务协作困难，软件或模型集成困难，基础设施共享困难。该过程的主要工具——仿真互操作参考模型，主要用于规范化开放式云架构的接口和信

息数据元模型。

参考流程放大后如图 4 所示。此过程由场景分析和仿真项目实施 2 个子过程组成。

仿真项目分析：仿真项目分析子过程从主体、客体和活动 3 个维度进行分析，生成了结构化任务清单。结构化任务清单是下一个子过程仿真项目实施

的输入。仿真项目实施：这个子过程生成了基于开放式云架构的复杂产品建模仿真系统，即仿真互操作项目。

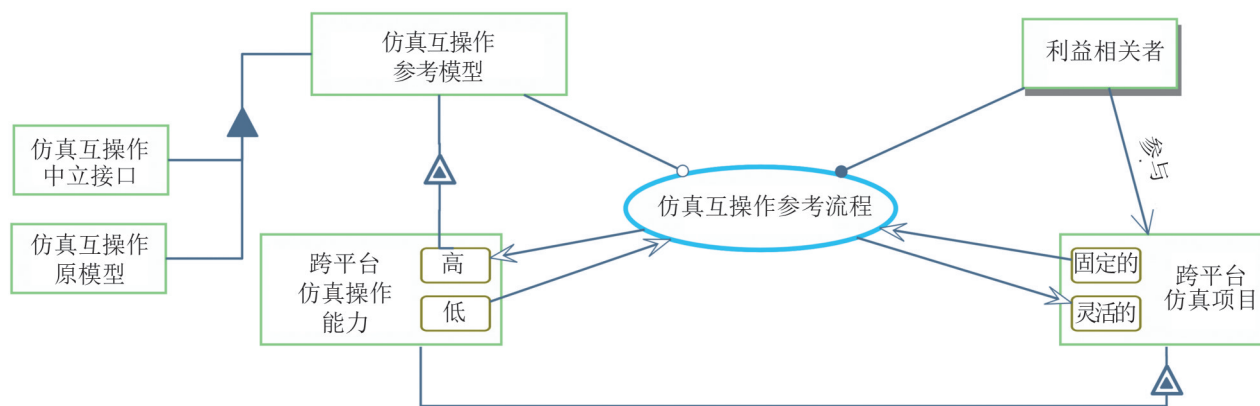


图 3 异构平台仿真互操作模型

Fig. 3 Heterogeneous platform simulation interoperability model

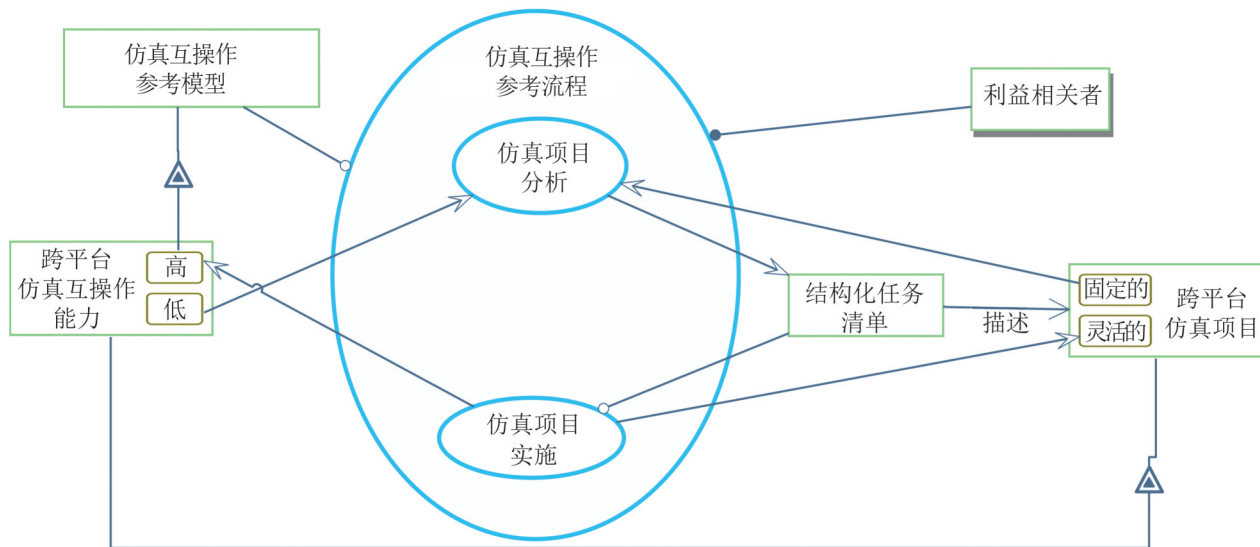


图 4 参考流程

Fig. 4 Simulation interoperability reference process

仿真项目实施放大后如图 5 所示, 仿真利益相关方主导此过程。结构化任务清单和仿真互操作参考模型(仿真互操作参考模型建立了一个用于指导项目实行的总体框架)是此过程需要的工具, 其中, 仿真互操作参考模型分为信息和信息数据元模型和中立的接口 2 个部分。此过程应当从 3 个层面考虑。业务描述层: 此过程需要结构任务清单和仿真互操作参考模型, 且创建了活动的描述。技术交互层: 此过程需要业务描述层创建的活动的描述, 并将其封装成仿真系统。基础设施支持层: 此过程需要业务描述层创建的活动的描述和技术交互层创建的仿真系统, 创建了基于仿真参考模型和参考过程的仿真互操作项目。

2.2.3 开放式云架构的部署视图设计

基础设施支撑即开放式云架构的部署视图, 本文为开放式云架构规定了统一的接口形式, 包括部署接口、注册接口、作业提交接口、状态监控接

口、仿真控制接口、结果返回接口、环境清理接口和服务清除接口。基础设施支撑层放大后如图 6 所示, 下面描述它的每一个子过程和相关元素。

部署: 此过程根据部署接口将服务部署。发布: 此过程通过注册接口将服务发布。实例化和开始: 此过程根据作业提交接口和想定文件, 将仿真模型实例化, 并开始仿真活动。状态监控和仿真分析: 此 2 个过程同时进行, 根据状态监控接口实现对仿真状态的监控, 根据仿真控制接口实现对仿真过程的控制。结果分析: 此过程根据仿真的特点和需求对仿真结果进行分析, 并判断是否结束仿真, 如果活动没有结束, 返回实例化和开始过程, 否则进行下一个过程。结束和结果取回: 此过程根据结果取回接口将结果取回。注销: 此过程根据环境清理接口, 在仿真结束后将服务注销, 释放基础设施资源。清除: 最后一个过程通过清除接口将服务清除。

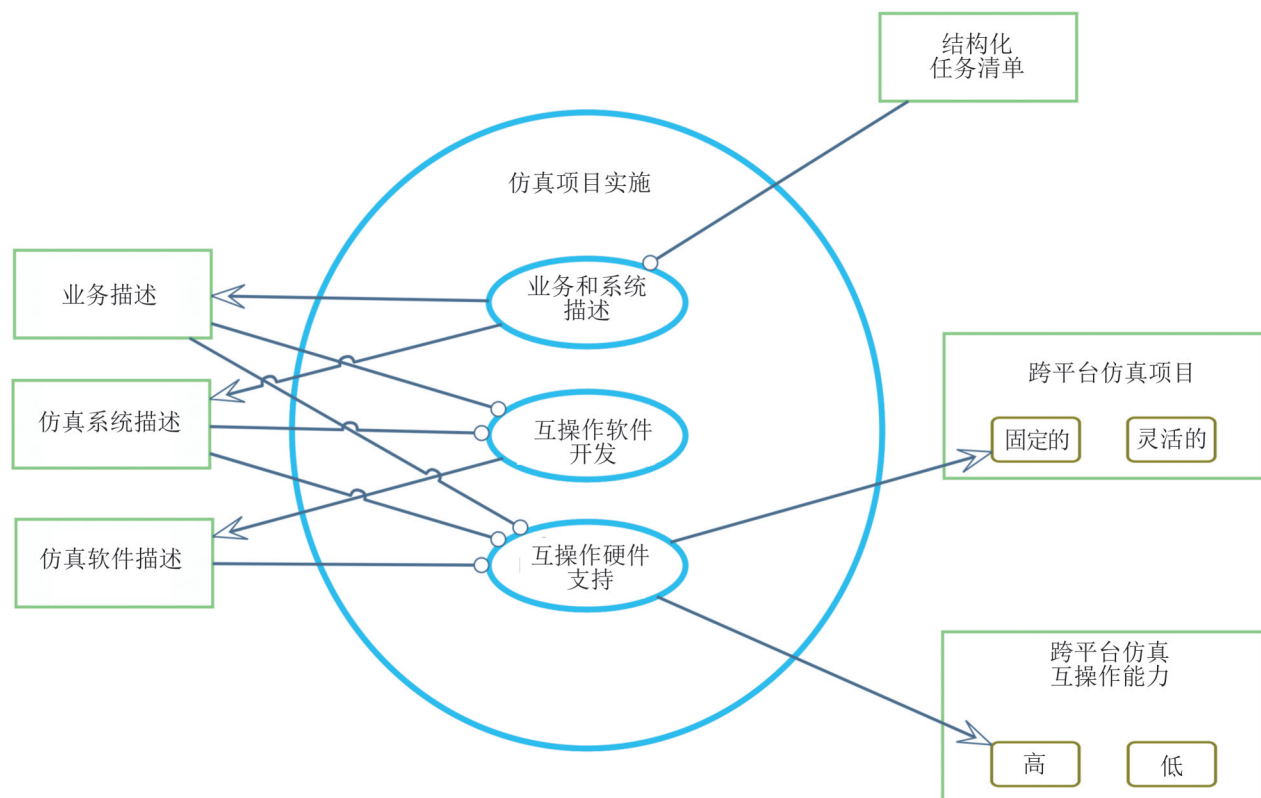


图 5 仿真项目实施
Fig. 5 Simulation project realizing

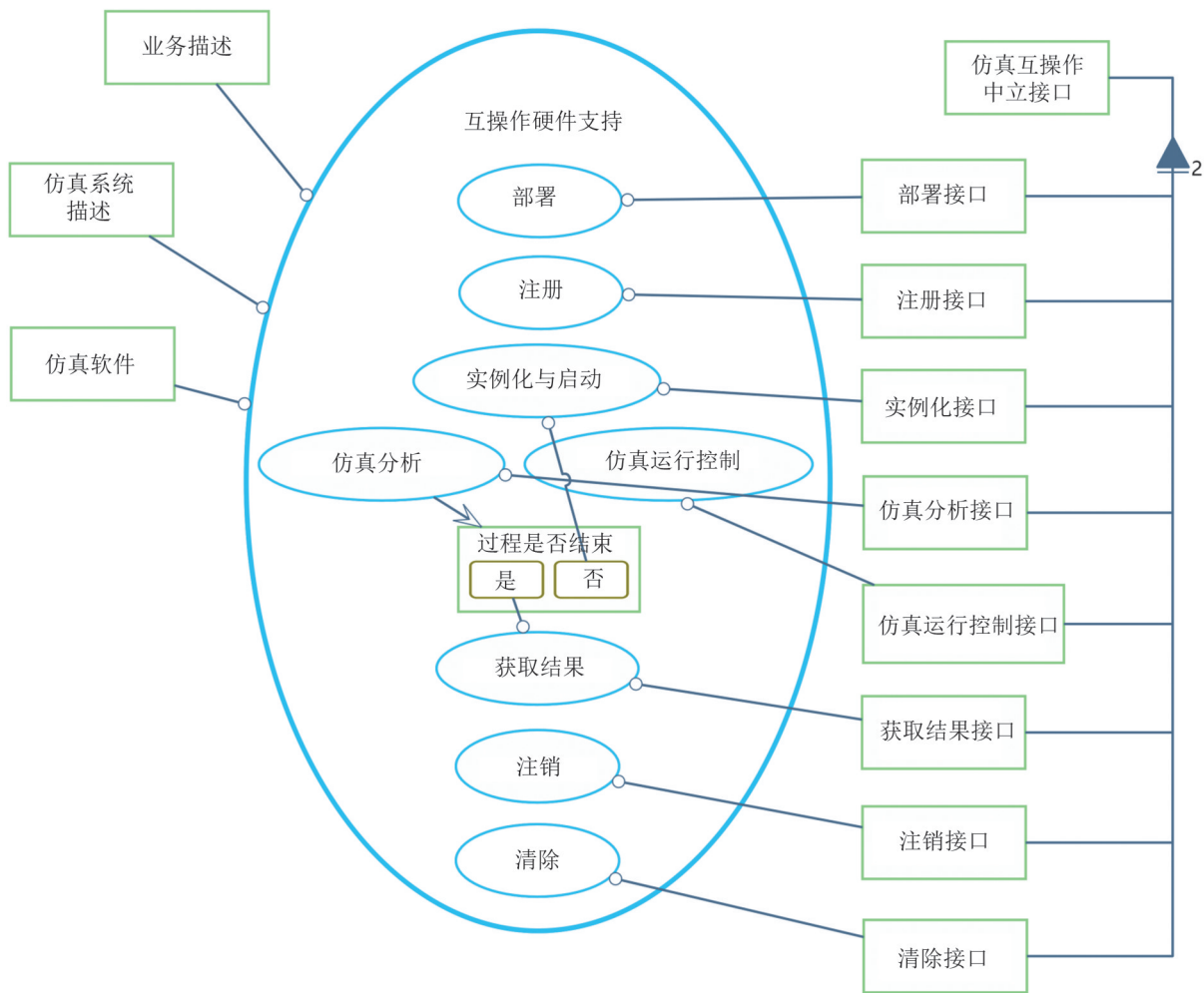


图6 基础设施支撑
Fig. 6 Infrastructure interoperation supporting

3 架构设计应用范例

面向航天领域的复杂产品研制周期长，涉及多学科多的应用需求，研究提出基于开放式云架构的多学科复杂产品建模与仿真系统，支撑基于协同设计建模的功能/性能/构造描述、智能优化驱动的多实例仿真，支持航天复杂产品的总体设计与指标优化。从复杂产品的方案论证到批生产的各个研制生产阶段，完成基于总体、分系统的仿真，实现各系统的方案设计、设计指标分配，提出各设备的设计要求，完成对系统问题和飞行试验的全工况的数字仿真、半实物仿真、试验等。

3.1 应用场景

控制系统的设计，往往涉及到目标运动学、控制、气动、动力学等多个领域的学科专业人员进行协同建模，以及全工况的数字仿真、半实物仿真、试验等阶段。基于开放式云架构的多学科复杂产品建模与仿真系统，通过运行在各种类型的基础设施之上的端建模仿真工具，向各个学科专业的人员提供服务化的协同建模仿真，并通过云服务器，实现对仿真资源的按需分配，分布交互协同仿真环境的多实例化，以及分布式交互仿真的调度。

3.2 应用效果

开放云架构的复杂产品建模与仿真系统中，

使用者通过端建模仿真工具发起仿真申请后, 仿真发起方、各个联合仿真方将模型部署在计算能力不同、操作系统不同、工具软件不同的基础设

施上。系统自动化地实现分布交互协同仿真环境的多实例化, 仿真任务调度, 完成仿真任务, 支撑控制系统的研制过程, 如图 7 所示。

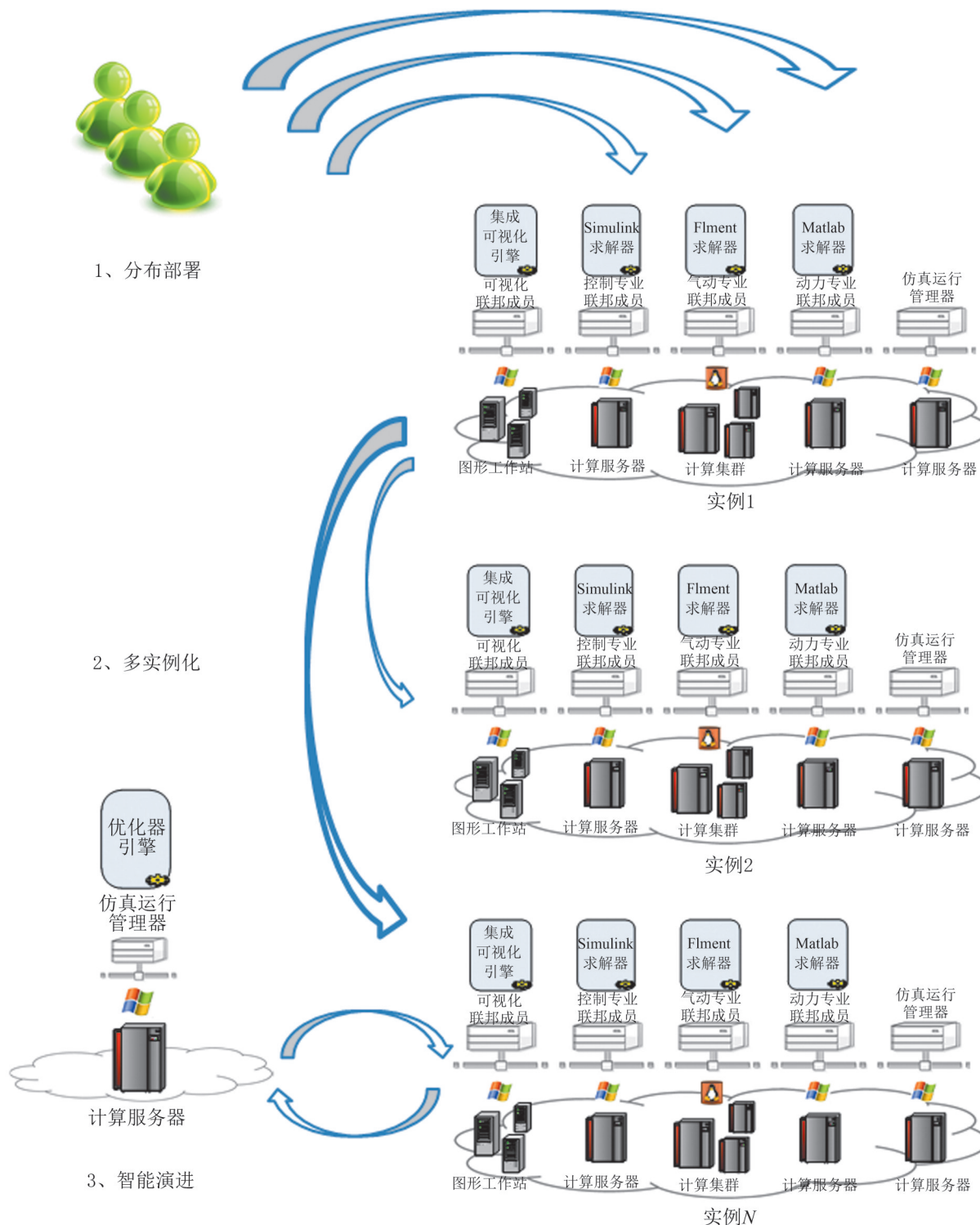


图 7 控制系统的研制应用范例典型环节

Fig. 7 Typical links of development and application examples of control systems

通过基于开放云架构的复杂产品建模与仿真系统，实现协同仿真试验验证能力，应用验证范例的主要流程包括：初始仿真程序开发、控制系统方案设计、详细仿真程序开发、控制系统详细设计、全工况数字同构仿真、跨单位异构仿真、半实物仿真、试验等阶段。在初始仿真程序开发和详细仿真程序开发阶段中，各学科的研究人员，

通过端建模工具建立各类专业模型。控制系统详细设计流程中，引入人工智能技术，使用智能的算法设计控制率。全工况数字同构仿真流程中，通过云仿真系统按仿真资源需求，自动化地部署同构的数字仿真实例，并自动化汇总仿真结果，实现系统自主完成全空域仿真，如图 8 所示。

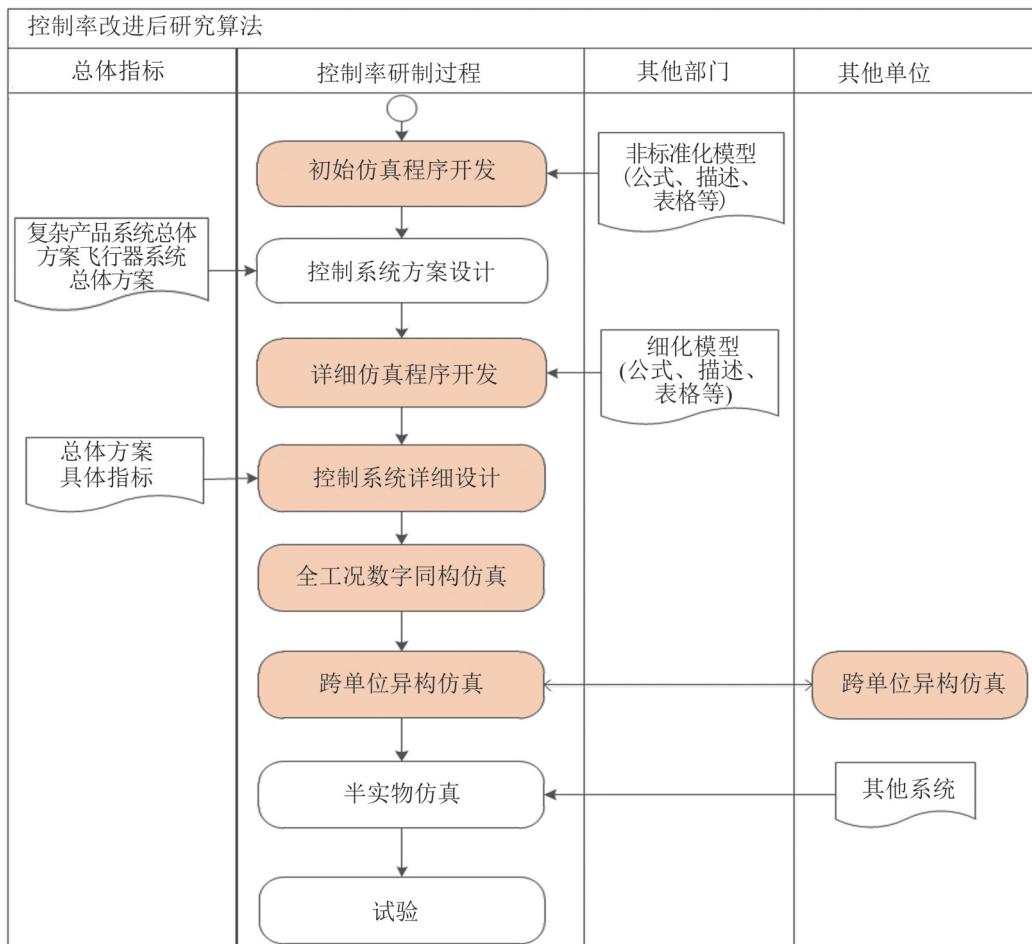


图 8 控制系统的研制应用范例流程
Fig. 8 Development and application example process of control system

由于航天复杂产品的各个研制生产阶段，需要基于总体、分系统的跨单位异构仿真，基于开放云架构的复杂产品建模与仿真系统能够通过将不同单位、部门的仿真模块部署在各类仿真资源上进行联合仿真，支持各单位对航天复杂产品总体系统、分系统的设计研制进行验证。总体部通过复杂产品建模与仿真系统，按需部署与实例化

运行航天复杂产品系统、分系统模型仿真应用。

4 结束语

本文提出了一种基于开放式云架构的复杂产品建模与仿真系统，主要贡献包括：

- (1) 提出了一种基于开放式云架构的复杂产品建模仿真系统，能够实现跨组织仿真资源的按需

共享、协同。

(2) 提出了一种新型的云仿真架构, 支撑用户随时随地、实时、连贯、透明地请求、访问和获得仿真服务。

(3) 提出了一套仿真资源的按需共享和协同的规范, 包括接口规范和信息数据元模型规范, 并通过OPM进行描述, 以便于利益相关方之间的交流。

通过基于开放式云架构的复杂产品建模与仿真系统的研究和初步实践, 对未来工作提出以下几点考虑:

(1) 基于开放式云架构的复杂产品建模与仿真系统还需在开放式云架构的基础上, 集成云、边、端一体化的调试功能。

(2) 基于开放式云架构的复杂产品建模与仿真系统还需基于本文提出的接口规范和信息数据元模型规范, 实现半实物仿真以及数字仿真到半实物仿真再到实物测试的无缝演化升级。

(3) 基于开放式云架构的复杂产品建模与仿真系统还需在考虑开放式云架构下的模型知识产权安全问题, 提高对模型信息的保护。

参考文献:

- [1] 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”[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(17): 5292-5299.
Li Bohu, Chai Xudong, Hou Baocun, et al. A Networked Modeling and Simulation Platform Based on Cloud Computing Concept ——“Cloud Simulation Platform”[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(17): 5292-5299.
- [2] Lin T Y, Li B H, Yang C. A Multi-Centric Model of Resource and Capability Management in Cloud Simulation[C]// 2013 8th EUROSIM Congress on Modelling and Simulation. Cardiff, United Kingdom: IEEE, 2013: 555-560.
- [3] Guo L, Wang M, Ruan C, et al. A Cloud Simulation Based Environment for Multi-Disciplinary Collaborative Simulation and Optimization[C]// 2017 IEEE 21st International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design (CSCWD). Wellington, New Zealand: IEEE, 2017: 445-450.
- [4] 魏志强, 施国强, 林廷宇, 等. 一种基于容器的云仿真系统设计方法[C]// 第三十三届中国仿真大会论文集. 北京: 2021: 213-219. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2021.024962.
Wei Zhiqiang, Shi Guoqiang, Lin Tingyu, et al. A Container-Based Cloud Simulation System Design Method [C]// Proceedings of the 33rd China Simulation Conference. Beijing: 2021: 213-219. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2021.024962.
- [5] Dahmann J S, Fujimoto R M, Weatherly R M. The DoD High Level Architecture: an Update[C]// 1998 Winter Simulation Conference. Proceedings (Cat. No. 98CH36274). New York: IEEE, 1998: 797-804.
- [6] Dahmann J S. High Level Architecture for Simulation[C]// IEEE International Symposium on Distributed Simulation and Real-Time Applications. Italy: IEEE, 1997: 9-14.
- [7] IEEE Standard for Modeling and Simulation High level Architecture-Framework and Rules (IEEE Std 1516-2010) [S]. USA: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2010.
- [8] Andersson C A J, Führer C. Import and Export of Functional Mock-up Units in Jmodelica.Org[C]// The 8th International Modelica Conference. Germany: Technical University Dresden, 2011: 329-338.
- [9] Nouidui T, Wetter M, Zuo W. Functional Mock-Up Unit for Co-Simulation Import in EnergyPlus[J]. Journal of Building Performance Simulation (S1940-1493), 2014, 7 (3): 192-202.
- [10] Blochwitz T, Otter M, Arnold M, et al. The Functional Mockup Interface for Tool Independent Exchange of Simulation Models[C]// 8th International Modelica Conference. Germany: Linköping University Press, 2011: 105-114.
- [11] Hannay J E, Van Den Berg T. The NATO MSG-136 Reference Architecture for M&S as a Service[C]// NATO Modelling and Simulation Group Symp. on M&S Technologies and Standards for Enabling Alliance Interoperability and Pervasive M&S Applications (STO-MP-MSG-149). 2017.
- [12] 彭超, 乐剑, 刘洁. 北约建模与仿真即服务研究[J]. 计算机仿真, 2021, 38(10): 1-4, 100.
Peng Chao, Le Jian, Liu Jie. NATO Modeling and Simulation as a Service Research[J]. Computer Simulation, 2021, 38(10): 1-4, 100.
- [13] Siegfried R, Van Den Berg T, Cramp A, et al. M&S as a Service: Expectations and Challenges[M]. Orlando, FL: SISO, 2014.
- [14] Dov Dori. Object-Process Methodology: A Holistic Systems Paradigm; with CD-ROM[M]. Berlin, Germany: Springer Science & Business Media, 2002.
- [15] Dori D. Model-Based Systems Engineering with OPM and SysML[M]. New York: Springer, 2016.