

11-20-2019

From Digital Twin to Digital Engineering Modeling and Simulation Entering a New Era

Zhang Bing

*National Computer Network Emergency Response Technical Team/Coordination Center of China, Beijing
100029, China;*

Li Xin

*National Computer Network Emergency Response Technical Team/Coordination Center of China, Beijing
100029, China;*

Xinxin Wan

*National Computer Network Emergency Response Technical Team/Coordination Center of China, Beijing
100029, China;*

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 Paper 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.

From Digital Twin to Digital Engineering Modeling and Simulation Entering a New Era

Abstract

Abstract: In the digital new era, all kinds of things and even the whole world can be digitized as a model. Simulation activities are conducted for various purposes, and the results can provide intelligent support for various decision-making. Digital twin is an important form of modeling and simulation application in the digital new era; it has been widely used in intelligent manufacturing, factories, buildings, smart cities and many other fields, showing a strong vitality; and its next step in the development direction is a comprehensive digital engineering. *This paper reviews the history of the development of digital twin technology, analyzes its present situation and development prospects, and introduces the latest digital engineering strategy by the US Department of Defense. The opportunities and challenges faced by modeling and simulation of digital new era are put forward.*

Keywords

Digital twins, digital engineering, modeling and simulation

Recommended Citation

Zhang Bing, Li Xin, Wan Xinxin. From Digital Twin to Digital Engineering Modeling and Simulation Entering a New Era[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(3): 369-376.

从数字孪生到数字工程建模仿真迈入新时代

张冰, 李欣, 万欣欣

(国家计算机网络应急技术处理协调中心, 北京 100029)

摘要: 数字新时代各种事物甚至整个世界都可以被数字化为模型, 进行各种目的的仿真活动, 仿真活动的结果可以为各种决策提供智能化支持。数字孪生是建模与仿真在数字新时代应用的重要形式, 已广泛应用于智能制造、智能工厂、智能建筑、智慧城市等诸多领域, 显示出强大生命力, 其下一步的发展方向是全面的数字工程。回顾数字孪生技术发展的历史, 分析其现状和发展前景。介绍美军最新发布《数字工程战略》总体情况, 提出数字新时代建模与仿真面临的机遇与挑战。

关键词: 数字孪生; 数字工程; 建模仿真

中图分类号: TP391.9; V448.2 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2019) 03-0369-08
DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.19-0018

From Digital Twin to Digital Engineering Modeling and Simulation Entering a New Era

Zhang Bing, Li Xin, Wan Xinxin

(National Computer Network Emergency Response Technical Team/Coordination Center of China, Beijing 100029, China)

Abstract: In the digital new era, all kinds of things and even the whole world can be digitized as a model. Simulation activities are conducted for various purposes, and the results can provide intelligent support for various decision-making. Digital twin is an important form of modeling and simulation application in the digital new era; it has been widely used in intelligent manufacturing, factories, buildings, smart cities and many other fields, showing a strong vitality; and its next step in the development direction is a comprehensive digital engineering. *This paper reviews the history of the development of digital twin technology, analyzes its present situation and development prospects, and introduces the latest digital engineering strategy by the US Department of Defense. The opportunities and challenges faced by modeling and simulation of digital new era are put forward.*

Keywords: Digital twins; digital engineering; modeling and simulation

引言

伴随着以网络化、信息化、智能化为特征的数字新时代的加速到来, 建模与仿真技术的发展也进入了数字时代。数字孪生是数字时代建模与仿真应用的重要形式, 近年来受到越来越高的关注和重

视。数字孪生的概念日臻成熟, 应用日益广泛, 其效力更加凸显, 成为有可能“改变游戏规则”的颠覆性技术机遇之一。

数字孪生的成功使美国国防部(DoD)深刻认识到, 数字化战争时代更加全面、系统、深入地运用建模与仿真、云计算、大数据、人工智能等关键赋能技术, 对提升应对全球复杂安全挑战能力, 保持绝对领先军事优势的重要意义。实施数字工程将成为美军迎接数字时代、完成数字化转型的关键。在长期探索的基础上, DoD 于 2018 年 6 月公布了



收稿日期: 2019-01-10 修回日期: 2019-01-15;
作者简介: 张冰(1973-), 男, 吉林, 博士, 高工, 研究方向为数字孪生与数字工程、复杂系统仿真;
李欣(1982-), 女, 北京, 博士, 高工, 研究方向为数字孪生城市; 万欣欣(1985-), 女, 吉林, 硕士, 工程师, 研究方向为大数据与人工智能。

<http://www.china-simulation.com>

《数字工程战略》。通过战略实施, 实现将数字计算、分析能力和新技术结合起来, 在更集中的虚拟环境中, 在用户和供应商的更深度参与下, 进行工程设计, 提升应对威胁速度, 加速技术融合, 降低文档成本, 并影响维持战斗力可承受性。这些综合的工程环境将使国防部及其工业合作伙伴从概念阶段起就共同进行设计, 并减少对昂贵的实体模型、不成熟的设计定型和物理测试的需求。

1 数字孪生

1.1 数字孪生概念产生和发展

数字孪生(Digital Twin, 简称 DT)的概念可以追溯到格里夫斯(Grievess)博士 2002 年在美国密歇根大学产品生命周期管理(PLM)中心向工业界所演示的幻灯片如图 1 所示, 当时标题为“PLM 的概念畅想”^[1]。其中已经包括了数字孪生的所有元素: 真实空间、虚拟空间和从真实空间到虚拟空间数据流的连接, 从虚拟空间流向真实空间和信息流程的连接。

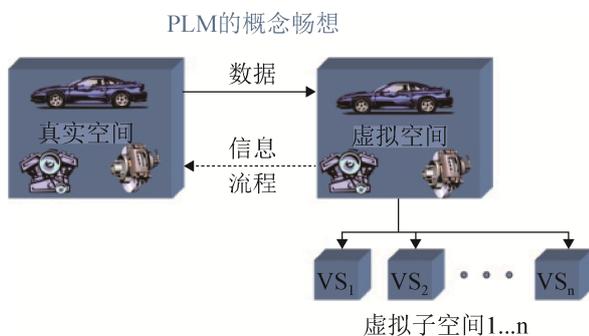


图 1 PLM 的概念畅想

Fig. 1 Conceptual outlook of PLM

格里夫斯(Grievess)博士后来在其教授的课程和著作中先后使用“镜像空间模型”(Mirrored Spaces Model)、“信息镜像模型”等描述数字孪生的概念。“信息镜像模型”的概念在《虚拟完美: 通过产品生命周期管理推动创新和精益产品》一书中获得极大的扩展。在书中, “数字孪生”这一术语被以引述共同作者描述该模型的方式与这一概念建立了关系。由于“数字孪生”这一提法概括性更强,

从此就被用于描述这一概念。

数字孪生目前尚无被普遍接受的统一定义, 其概念仍处于发展与演变中。美国空军将数字孪生定义为一种面向飞行器或系统的高度集成的多物理场、多尺度、多概率的仿真模型, 它能够利用物理模型、传感器数据和历史数据等反映与该模型对应的实体的功能、实时状态及演变趋势等。近年来, 数字孪生已成为航天和航空航天领域的基础概念, 美国宇航局(NASA)在其技术路线图^[1]和可持续太空探索提案^[2]中均使用了这一概念。该概念已经被提出用于下一代战斗机和 NASA 车辆^[3-4]。

工业界和学术界对数字孪生也有着多种不同的理解。高德纳(Gartner)公司将数字孪生定义为实体对象的虚拟副本, 意味着它可以是产品、结构、设施或系统^[5]。德勤公司认为, 从根本上讲, 数字孪生是以数字化的形式对某一物理实体过去和目前的行为或流程进行动态呈现, 其真正功能在于能够在物理世界和数字世界之间全面建立准实时联系^[6]。时培昕认为, 数字孪生是指针对物理世界中的物体, 通过数字化的手段来构建一个与数字世界中一模一样的实体, 借此来实现对物理实体的了解、分析和优化^[7]。王鸿庆认为, 数字孪生是充分利用物理模型、传感器更新、运行历史等数据, 集成多学科、多物理量、多尺度的仿真过程, 在虚拟空间中完成对物理实体的映射, 从而反映物理实体的全生命周期过程^[8]。

虽然数字孪生术语随着时间的推移发生了变化, 但基本概念从 2002 年被提出以来就保持的非常稳定。它是基于这样一种观点, 即: 关于物理系统的数字信息构造可以作为一个独立的实体创建, 这种数字信息是嵌入在物理系统内的信息的“孪生”, 并在整个系统生命周期内与该物理系统相连接。

1.2 数字孪生的广泛应用

格里夫斯博士虽然早在 2002 年就提出了数字孪生的概念, 但由于当时技术和认知上的局限, 该概念并没有得到重视。数字孪生在美国航天和航空领域发挥巨大作用后, 才真正引起关注^[9], 并逐步

扩展到了虚拟仿真、虚拟装配和 3D 打印等领域。2014 年以后, 随着物联网、人工智能和虚拟现实等技术不断发展, 更多工业产品、工业设备具备了智能特征, 数字孪生也逐步扩展到包括制造和服务在内的完整的产品周期阶段。

2016 年以来, 随着西门子、通用电气等知名企业的频繁使用带来的示范效应以及一些专家的介绍, 数字孪生受到越来越多的关注。世界最大的武器生产商洛克希德马丁公司于 2017 年 11 月将数字孪生列为未来国防和航天工业六大顶尖技术之首。Gartner 更是连续 4 年(2016-2019)将数字孪生列为当年十大战略科技发展趋势之一。数字孪生尽管尚未成为主流, 却已是每一个企业都不能回避的命题。未来, 随着传统制造业转型升级需求的加速, 数字孪生势必将会在更多领域发挥更为重要的作用, 特别是随着建模仿真技术与物联网、大数据、人工智能技术的进一步融合, 数字孪生的价值和作用将会得到更大的体现。

据 Gartner 预测, 到 2020 年, 预计将有超过 200 亿个连接的传感器和终端, 而数字孪生将存在于潜在的数十亿的设备中。这将有损于资产优化、竞争差异化, 且几乎所有行业的用户体验改善。到 2021 年, 一半的大型工业公司将使用数字孪生, 从而使这些组织的效率提高 10%。物联网项目提升了人们对数字孪生的兴趣。精心设计的数字孪生资产可以显著改善企业决策。它们与现实世界的对应物相关联, 用于理解设备或系统的状态、响应变化、改进操作和增加价值如图 2 所示。

数字孪生正被用来优化有形资产、系统和制造流程的操作和维护^[10], 其中, 物理对象可以虚拟地与其他机器和人互动^[11]。数字孪生已用于如发电涡轮机、喷气发动机和机车的设备维护。其他的案例包括使用 3D 建模为物理对象创建“数字伙伴”^[12], 可以用来查看真实物理对象的状态, 为将物理对象投射至数字世界提供方法^[13]。例如, 当传感器从连接的设备收集数据时, 传感器数据可

用于实时更新设备状态的“数字孪生”副本。“设备影子”(Device Shadow)一词也用于描述数字孪生的概念。数字孪生还可以用于监测、诊断和预测, 以优化资产性能和利用率。在该领域, 传感器数据与历史数据、人类专业知识、敏捷和深度学习相结合, 提高改善预测结果。因此, 复杂的预测和智能维护系统平台可使用数字映射发现问题根源并提高生产率^[14]。数字孪生还有更多的行业应用: 飞机发动机^[15], 风力发电机^[16], 大型结构设备, 如海上平台、海上船舶等^[17], 暖通空调控制系统^[18], 机车制造^[19], 建筑物^[20], 公用事业(电力、煤气、水、废水网络)。

数字孪生的典型应用场景:

(1) 数字孪生应用于产品研发

大部分的产品研发成本都锁定在概念设计阶段, 使得早期快速迭代变得非常关键。借助数字孪生, 能帮助用户以更少的成本和更快的速度将创新技术推向市场。运用数字孪生, 用户能够利用结构、热学、电磁、流体和控制等仿真软件进行单独的物理场和耦合的多物理场研究, 从而实现产品的设计优化、验证和确认, 以满足相关的需求, 如图 3 所示。同时, 用户可以构建精确的综合仿真模型来了解实际产品性能并持续创新, 这些功能是传统设计方法所无法企及的。

(2) 数字孪生应用于工艺规划

随着产品制造过程越来越复杂, 制造中所发生的一切需要进行完善的规划。应用数字孪生, 对所需制造的产品及其制造方式、资源以及地点等都可进行系统规划, 并将各方面关联起来, 实现设计人员和制造人员的协同。一旦发生设计变更, 可以在数字孪生模型中方便地更新制造过程。除了过程规划之外, 生产布局也是智能制造系统需要解决的重要问题。借助数字孪生模型可以设计出包含所有细节信息的生产布局, 包括机械、自动化设备、工具、资源甚至是操作人员等各种详细信息, 并将之与产品设计进行无缝关联。

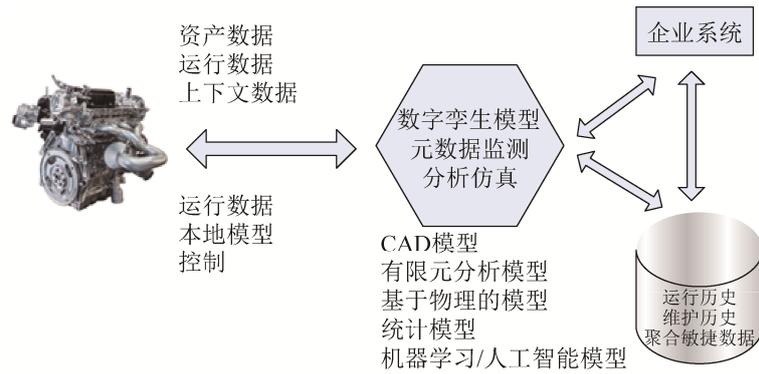


图 2 数字孪生的应用模型

Fig. 2 Application model of Digital Twin

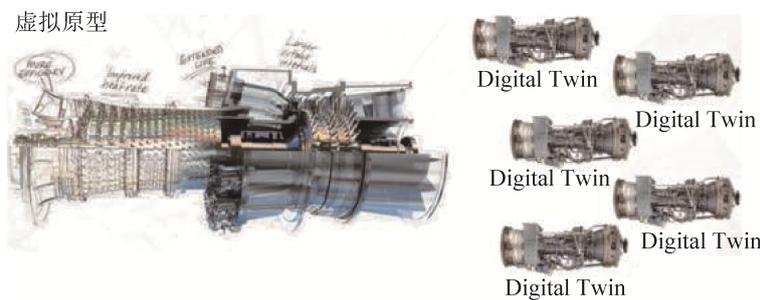


图 3 数字孪生应用于产品设计

Fig. 3 Digital Twin's application in product design

(3) 数字孪生应用于精益制造

产品制造环节的流程越来越复杂, 难免出现各种问题并影响到产出, 有时很难迅速找出问题所在。应用数字孪生, 可以对不同的制造策略进行仿真和评估, 结合大数据技术和统计学分析, 快速找出有空档时间的工序。调整策略后再仿真整个制造系统的绩效, 进一步优化实现所有资源利用率的最大化, 确保所有工序上的所有人都尽其所能, 实现盈利能力的最大化。此外还可利用大数据技术, 直接从制造设备中收集实时的质量数据, 将其输入数字孪生模型, 对设计和实际制造结果进行比对, 检查二者是否存在差异, 找出存在差异的原因和解决方法, 确保制造能完全按照规划来执行。

(4) 数字孪生应用于设备维护

数字孪生是实际运行设备的实时虚拟版本, 可以用来提供产品的性能与维护信息。通过设备上的各种传感器将温度、振动、碰撞、载荷等数据实时输入数字孪生模型, 并使数字孪生的环境模型与实际设备工作环境的变化保持一致, 通过数字孪生在

设备出现状况前提早进行预测, 以便在预定停机时间内更换磨损部件, 避免意外停机, 如图 4 所示。另外, 用户还可利用收集到的数据改进新一代机器的设计。

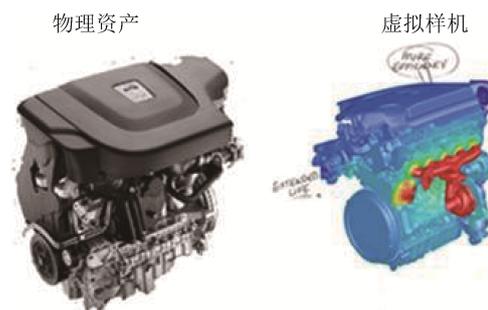


图 4 数字孪生应用于设备运行维护

Fig. 4 Digital Twin's application in operation and maintenance

(5) 数字孪生应用于智慧城市建设

2008 年 11 月, 在美国纽约召开的外国关系理事会上, IBM 提出了“智慧地球”这一理念, 引发了智慧城市建设的热潮^[21]。近年来, 一些国家将数字孪生应用于智慧城市建设, 如 2016 年新加

坡与美国麻省理工学院合作的 CityScope 为新加坡城市规划量身定制城市运行仿真系统; 在欧盟 800 万欧元资助下, 西班牙智慧桑坦德在城市中广泛部署传感器, 感知城市环境、交通、水利等运行情况, 并将数据汇聚到智慧城市平台中的城市仪表盘, 初步形成了数字孪生城市的雏形, 成为欧洲可推广的模板之一。当前, 数字孪生主要应用于城市规划和管理方面, 未来将向城市服务方面扩展, 通过服务场景、服务对象、服务内容等方面的数字孪生系统构建, 引发服务模式向虚实结合、情景交融、个性化、主动化方向加速转变^[22], 如图 5 所示。



图 5 数字孪生城市应用场景
Fig. 5 Digital Twin city application scenario

2 数字工程战略

2.1 美军数字工程的转型背景

数字孪生近年已经在美国航空航天项目中得到实际应用, 但更多是面向装备的全生命周期, 对武器系统交付前的采办阶段力有不逮。同时, 分散于各个部门的系统、流程、工具等也对美军应对挑战时快速响应、协作构成威胁。因此, 美国国防部决心从 2015 年起实施数字工程转型。国防部将数字工程定义为一种综合(集成)的数字方法, 它使用权威的系统数据和模型作为跨学科连续体, 以支持从概念到处理的生命周期活动^[23]。美军推进数字工程旨在将以往线性的以文档为中心的采办流程转变为动态的以数字模型为中心的数

字工程生态系统, 使美军完成向以模型为中心谋事做事的范式转型。美军推进数字工程, 打造数字工程生态系统, 将使现有的工程学科提升为一个基于模型的综合化方法, 充分利用数字化的进展和技术创新, 使美军整体受益^[24]。

2.2 数字工程战略

美国国防部研究与工程副部长迈克尔·格里芬于 2018-06-25 签发《国防部数字工程战略》(以下简称《战略》)。《战略》旨在指导整个国防部数字工程转型的规划、发展和实施。

《战略》指出, 数字技术已经彻底改变了多数主要行业的业务以及我们的个人生活活动。通过提高计算速度、存储能力和处理能力, 数字工程赋予了从传统的“设计-构建-测试”方法到“模型-分析-构建”方法的范式转变。这种方法可以使国防部的项目在交付给作战人员之前, 能够在虚拟环境中构建原型, 进行实验和测试, 支撑决策和确定解决方案。数字工程将需要新的方法、过程和工具, 这将改变工程社区的运作方式; 然而, 这种转变对研究、需求、采集、测试、成本、维持和情报社区产生了影响。数字工程转型为业务运作提供了类似的积极变化, 包括采办实践、法律要求和合同活动。

国防部数字化工程的愿景是: 使国防部设计、开发、交付、运作和维护系统全面现代化。国防部的方法是稳妥安全地连接端到端的数字企业中的人员、流程、数据和功能。这将允许在整个生命周期中使用模型以数字方式代表虚拟世界中感兴趣的系统(即系统的系统、系统、过程、设备、产品、零件)。国防部将整合先进计算、大数据分析、人工智能、自主系统和机器人技术等来改进工程实践。

《战略》列出了国防部数字工程倡议的五大战略目标:

- (1) 规范模型的开发、集成与使用。实现设计模型、制造模型、审核与验证模型、系统模型、生产支撑模型、特种工程模型、管理模型之间标准化数据的无缝流通, 服务于企业和项目决策。
- (2) 提供持久、权威的可信源(即基础数据与模

型)。这使得访问、管理、分析、使用和分发来自一组通用数字模型和数据的信息成为可能。因此,授权的利益相关者能在生命周期内使用当前的、权威和一致的信息。

(3) 将技术创新融入工程实践的改进。利用大数据与分析、认知技术、先进计算技术、数字与物理融合技术,以及新方法和人机协作,推动向端到端的数字企业转型。

(4) 构建数字工程的支撑架构和环境。包括工具、流程、方法、软硬件、网络、安全等,实现各利益相关者之间的互动、协作与沟通。

(5) 完成文化与团队的数字转型。面向对全生命周期数字工程的适应与支撑,通过沟通与接触、领导方式、战略与实施、训练与教育的持续性改进,实现整个采办部门数字工程的制度化。

3 数字时代建模仿真机遇与挑战

数字孪生的发展和数字工程战略的提出,预示以第四次工业革命为代表的数字时代正加速到来。作为一项已经走过七十多年历程的科学技术,建模与仿真技术在数字时代将迎来全新的发展机遇,同时也面临很多挑战。数字时代,建模与仿真的应用将更加普及,从实验室进一步走进工厂、办公室、校园、社区,成为生产生活越来越不可缺少的工具。

3.1 重大机遇

物联网、大数据使数字时代建模与仿真在线化、泛在化、常态化成为可能。数字时代的典型特征是通过无所不在的传感器网络构建的物联网广泛地搜集现实世界的海量数据,运用大数据分析技术进一步提升人类决策与控制能力。以数字孪生为代表,数字时代的建模与仿真可以与真实世界建立永久、实时、交互的链接,建模与仿真不再是离线的、独立的、特定阶段的存在,而是向在线化、泛在化、常态化的服务发展。建模与仿真将是数字时代各种应用不可或缺的工具应用,其形式将更加多样化,集成应用也更加便捷。

数字工程战略的提出有助于建模与仿真朝着科学化、规范化、智能化发展。数字时代的建模与仿真将更加科学化,体现在建模与仿真的科学基础更加稳健深入;更加规范化,体现在标准统一,流程更加科学;更加智能化,体现在新一代人工智能和机器学习在建模与仿真中广泛应用。数字时代建模与仿真朝着科学化、规范化、智能化方向发展,将促进数字工程战略的全面落实,实现其愿景目标。数字工程战略是对传统的工程思想的一次变革,建模与仿真作为数字工程战略的核心支撑技术也面临进一步变革自身的需要,只有如此才能有力支撑数字工程全面实施。

云计算、超级计算、量子计算的发展使数字时代建模与仿真不再受到计算能力的局限,从而为数字孪生与数字工程发展提供无限可能。近年来,芯片技术和软件技术的不断发展,使超级计算机的能力不断提升。云计算的发展使计算、存储、通信能力变成一种可以按需获取并可海量增长的资源。量子计算日益受到广泛关注并逐步显示威力,为彻底解决建模与仿真计算能力需求提供的巨大希望。计算能力局限的打破将进一步提升模型的精细化程度,更全面满足仿真应用目标的需要,推动数字孪生与数字工程等创新应用的更快发展。

数字时代的仿真产业发展将迈上新台阶。近年来,仿真需求的不断涌现已推动各国仿真产业从无到有并开始规模化发展。数字孪生的成功应用和数字工程战略的提出将促进建模与仿真需求的井喷式增长,带动投资和人力资源的不断进入仿真产业。建模与仿真将迎来难得的发展机遇期,抓住机遇,乘势而上,建模与仿真将在数字时代产业转型中奠定更加坚实的应用基础,创造更大的市场空间。

3.2 主要挑战

在把握数字时代建模与仿真重大机遇的同时,也必须认清目前面临的挑战。

理论挑战。大数据和复杂系统仿真结合的“数字孪生”系统可以兼顾“过程”与“结果”,对“过去和未来”的全面情况进行深入学

习, 实现更加智能的建模与仿真。数据时代的来临给传统建模与仿真实理论方法提出了挑战。传统仿真与大数据仿真相比, 仿真实理论重心从模型转向数据, 仿真方法从抽样和发现因果关系转到全局的和发现相关关系。以仿真计算为代表的科学研究第三范式和以大数据分析为代表的第四范式需要研究融合发展之道, 从而建立更加坚实的数字时代建模与仿真实理论基础。

信任挑战。可信性是建模与仿真生命力之源, 建模与仿真可信性验证一直是仿真技术发展面临的主要挑战之一。数字孪生与数字工程等更加强调将建模与仿真结果作为权威可信数据源, 这对模型可信度和精度都提出了更高的要求。数字孪生与数据工程是复杂性、实时性、交互性、多样性极强的仿真应用, 对其进行可信性评估往往超出了当前方法所能满足的需求极限, 必须深入分析数字时代建模与仿真可信性评估的需求特征, 研究更加有效地评估理论与方法。

管理挑战。数字孪生与数字工程均需要进一步集中管理和积极利用模型、数据、支撑环境等仿真资源, 这给数字时代建模与仿真管理带来新的挑战。需要在全生命周期中为模型创建、管理、集成以及相关的项目和企业工程活动制定正式计划, 描述在执行工作活动时如何以连贯有效的方式实现模型, 以及支持分析和决策。建立一个规范的体系, 确定模型开发应遵循的基本质量标准 and 规则(如, 语法、语义、词汇、标准等)。获取和维护模型来源和谱系, 以建立可信度、准确性和判断模型重用的基础。制定政策和程序, 以确保正确使用权威的可靠源。

安全挑战。数字孪生和数字工程使建模与仿真资源和基础设施越来越开放, 其受到攻击的可能性越来越高。建模与仿真工具存在的漏洞将更多暴露于开放互联环境, 使其安全性面临巨大挑战。《战略》明确要求加强数字工程平台的安全性, 以确保其战略的顺利实施。

文化挑战。数字孪生与数字工程实施面临的更根本性挑战是变革已有的组织文化。需要采用深思

熟虑的系统方法来规划, 实施和支持组织的数字化工程转型。这种转型必须超越技术, 以解决人员和文化等劳动力挑战, 其中包括组织的共同价值观、信仰和行为。这些规范和信念从根本上可以影响人们的行为方式。为了成功实施数字工程, 需要变革劳动力, 以促进文化变革, 手段包括培训、教育、战略沟通、领导和持续改进。但培训和教育不是组织文化变革的唯一动力, 必须鼓励通过形成新的习惯和行为来应用这些知识, 并通过让利益相关者(无论是组织内部还是外部)参与作出积极决定, 从而在整个生命周期中更好地实现数字功能和功效。

4 结论

数字孪生的快速发展和美国国防部《数字工程战略》的发布标示着数字时代已开始进入快速发展阶段, 随着技术方案和支撑环境的不断成熟, 数字孪生和数字工程将快速普及, 成为数字时代经济发展、社会进步和国家安全的重要支撑平台。作为数字孪生和数字工程中的核心关键技术, 建模与仿真将迎来重要的发展机遇期, 面临更多更复杂更迫切的应用需求。与此同时, 云计算、物联网、大数据、人工智能等支撑技术的突飞猛进, 为数字时代建模与仿真发展提供了新的源动力。未来, 我们可积极学习借鉴国际数字孪生和数字工程发展经验, 结合我国各行各业的现实需求, 积极推进我国数字孪生和数字工程的发展进步, 使其成为我国自主创新和产业升级重要支撑平台。

参考文献:

- [1] Grieves M. Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication[EB/OL]. [2018-11-12].http://innovate.fit.edu/plm/documents/doc_mgr/912/1411.0_Digital_Twin_White_Paper_Dr_Grieves.pdf.
- [2] Grieves M. Product Lifecycle Management: Driving the Next Generation of Lean Thinking[M]. New York: McGraw-Hill, 2006.
- [3] Tuegel E J, A R Ingrassia, T G Eason, et al. Spottswood. Reengineering Aircraft Structural Life Prediction Using a Digital Twin[J]. International Journal of Aerospace Engineering (S1687-5974), 2011(8): 1-14.
- [4] Glaessgen, E H, D Stargel. The Digital Twin Paradigm

- for Future NASA and US air force vehicles[C]. AAIA 53rd Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, Honolulu, Hawaii, 2012: 325-328.
- [5] Gartner. Gartner Survey Reveals Nearly Half of Organizations Implementing IoT Are Using or Plan to Use Digital Twin Initiatives in 2018[EB/OL]. [2018-03-13]. <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2018-03-13-gartner-survey-reveals-nearly-half-of-organizations-implementing-iot-are-using-or-plan-to-use-digital-twin-initiatives-in-2018>.
- [6] 德勤. 制造业如虎添翼_工业 4_0 与数字孪生 [EB/OL]. [2018-02-02].<https://www2.deloitte.com/cn/zh/pages/consumer-industrial-products/articles/industry-4-0-and-the-digital-twin.html>.
Deloitte. Manufacturing industry gaining new wheel _Industrial 4_0 and digital twins[EB/OL]. [2018-02-02]. <https://www2.deloitte.com/cn/zh/pages/consumer-industrial-products/articles/industry-4-0-and-the-digital-twin.html>.
- [7] 戴晟, 赵罡, 于勇. 数字化产品定义发展趋势: 从样机到孪生[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2018, 30(8): 1554-1562.
Dai S, Zhao G, Yu Y. Development trend of digital product definition: from prototype to twin [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2018, 30(8): 1554-1562.
- [8] 王鸿庆, 杨雨辰. 工业 4.0 术语: Digital Twin 数字孪生 [EB/OL]. [2016-05-19]. <https://mp.weixin.qq.com/s/98xLVNpEC4i8WM7HakCSpA>.
Wang H Q, Yang Y C. Industry 4_0 terminology: Digital Twin[EB/OL]. [2016-05-19]. <https://mp.weixin.qq.com/s/98xLVNpEC4i8WM7HakCSpA>.
- [9] 陶飞, 刘蔚然. 数字孪生及其应用探索[J]. 计算机集成制造系统. 2018, 24(1): 1-18.
Tao F, Liu W R. Exploration of Digital Twins and Their Applications[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2018, 24(1): 1-18.
- [10] Ferguson S, Bennett E. Digital twin tackles design challenges[J]. World Pumps (S0262-1762), 2017, 17(4): 26-28.
- [11] David Bolton. What Are Digital Twins And Why Will They Be Integral To The Internet Of Things[EB/OL]. [2018-04-22]. <https://arc.applause.com/2016/11/23/digital-twins-iot-faq>.
- [12] Youtube. Shaping the Future of the IoT[EB/OL]. [2015-09-22]. <https://www.youtube.com/watch?v=ibdm1zU6G3Q>.
- [13] Schleich B, Anwer N, Mathieu L, et al. Shaping the digital twin for design and production engineering[J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology (S0007-8506), 2017, 66(1): 33-35.
- [14] Colin Parris. Digital twin: Exploring what's possible[EB/OL]. [2017-07-26]. <https://www.youtube.com/watch?v=YCjO4XQE7Q>.
- [15] Lee Jay, Bagheri Behrad, Kao Hung-An. A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4_0-based manufacturing systems[J]. Manufacturing Letters (S2213-8463), 2015(3): 18-23.
- [16] Infosys Insights. The Future For Industrial Services: Digital Twin[EB/OL]. [2017-03-15]. <https://www.infosys.com/insights/services-being-digital/Documents/future-industrial-digital.pdf>.
- [17] Fei T, Cheng J, Qi Q, et al. Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology (S0268-3768), 2018, 94(9/10/11/12): 3563-3576.
- [18] Holger Leue. How Twinning Tech will Power Our Future.[EB/OL]. [2017-07-26]. <http://www.ozy.com/fast-forward/how-twinning-tech-will-power-our-future/71993>.
- [19] Roland Rosen, Georg von Wichert, George Lo, et al. Bettenhausen. About the importance of autonomy and digital twins for the future of manufacturing[J]. IFAC PapersOnLine (S2405-8963), 2015, 48(3): 567-572.
- [20] Bacchiega IRS srl, Gianluca. Embedded digital twin[EB/OL]. [2017-06-01]. <https://www.slideshare.net/gbacchiega/embedded-digital-twin-76567196>.
- [21] 郭理桥. 新型城镇化与基于“一张图”的“多规融合”信息平台[J]. 城市发展研究, 2014, 21(3): 1-3.
Guo L Q. New Urbanization and Multi-gauge Fusion Information Platform Based on One Picture[J]. Urban Development Research, 2014, 21(3): 1-3.
- [22] 高艳丽, 陈才. 数字孪生城市研究报告(2018 年) [EB/OL]. [2018-12-26].<http://www.caict.ac.cn/kxyj/qwfb/bps/201812/P020181219312264715970.pdf>.
Gao Y L, Chen C. Study report on digital twin city (2018) [EB/OL]. [2018-12-26]. <http://www.caict.ac.cn/kxyj/qwfb/bps/201812/P020181219312264715970.pdf>.
- [23] Department of Defense. Digital Engineering Strategy [EB/OL]. [2018-11-22]. <https://www.acq.osd.mil/se/docs/2018-DES.pdf>.
- [24] 刘亚威. 数字线索助力美空军装备研制[J]. 测控技术, 2018, 37(9): 1-4.
Liu Y W. Digital clue helps US Air Force equipment development[J]. Measurement & Control Technology, 2018, 37(9): 1-4.