

6-9-2021

## Discussing Digital Twin from of Modeling and Simulation

Zhang Lin

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

Lu Han

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

---

## Discussing Digital Twin from of Modeling and Simulation

### Abstract

**Abstract:** The development and evolution of modeling and simulation technology, and its importance in scientific and technological progress are briefly reviewed. The intrinsic relation between digital twin and modeling and simulation is revealed by analyzing the background and concept of digital twin. The way to build and evaluate a digital twin based on modeling and simulation theoretical methods is discussed. to ensure the credibility.

### Keywords

modeling and simulation (M&S), digital twin, credibility, model building, model engineering

### Recommended Citation

Zhang Lin, Lu Han. Discussing Digital Twin from of Modeling and Simulation[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(5): 995-1007.



**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,中国仿真技术产业联盟理事长,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。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。

## 从建模仿真看数字孪生

张霖<sup>1,2</sup>, 陆涵<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:** 简要回顾建模仿真技术的发展与演变历程,及其在科技进步中所发挥的重要作用。通过数字孪生产生的背景及内涵,揭示其与建模仿真一脉相承的关系。探讨如何借鉴建模仿真理论方法进行数字孪生的构建和评估,从而保证数字孪生的可信。

**关键词:** 建模仿真; 数字孪生; 可信性; 模型构建; 模型工程

中图分类号: TP391.9      文献标志码: A      文章编号: 1004-731X (2021) 05-0995-13

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.21-0262

### Discussing Digital Twin from of Modeling and Simulation

Zhang Lin<sup>1,2</sup>, Lu Han<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:** The development and evolution of modeling and simulation technology, and its importance in scientific and technological progress are briefly reviewed. The intrinsic relation between digital twin and modeling and simulation is revealed by analyzing the background and concept of digital twin. The way to build and evaluate a digital twin based on modeling and simulation theoretical methods is discussed. to ensure the credibility.

**Keywords:** modeling and simulation (M&S); digital twin; credibility; model building; model engineering

## 引言

近年来,数字孪生(Digital Twin, DT)成为智能制造、工业互联网等领域的研究热点。由于数字孪生与仿真的密切关系,使得仿真技术也受到空前的关注。虽然对于仿真技术的研究和应用已经有着 60 多年的历史,但由于不同行业不同领域应用仿真技术的深度和广度不同,使得人们对于仿真的概念、研究内容、知识体系及其价值等出现了各种不同的认识和理解,由此导致人们对于数字孪生和仿真的关系也产生了多种多样的解读,这既不利于数字孪生技术的发展,也不利于仿真技术的应用和推广。本文试图通过对仿真技术的发展历史进行较为系统的梳理,从而使得人们更加全面、深入地认识仿真。在此基础上理清

收稿日期: 2021-03-29      修回日期: 2021-03-31

基金项目: 国家重点研发项目(2018YFB1701600); 国家自然科学基金(61873014)

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

数字孪生和仿真的历史渊源, 进而更好地理解数字孪生的本质与内涵。此外, 仿真经过长期的积累已经形成了较为完善的理论、方法和技术体系, 这些可以为数字孪生的研究和应用提供坚实的基础和有力的支撑。

## 1 建模仿真的发展历程

### 1.1 仿真的发展和演变

仿真是人类认识世界的一种基本且富有成效的思维模式。早在春秋时期, 墨子为了避免宋国被楚国进攻, 以衣带围作城墙, 用木片作器械, 和鲁班进行了一场攻防对抗的仿真, 最终避免了一场战争。20 世纪 40 年代, 美国在曼哈顿计划中, 通过复现核链式反应过程的仿真, 拓展了对核裂变的理解, 加速了原子弹的研制, 最终促成了第二次世界大战的结束<sup>[1]</sup>。

现代计算机仿真技术是伴随着世界上第 1 台通用计算机 ENIAC 的诞生而出现的。当年, 冯·诺伊曼在 ENIAC 上实现了经典的蒙特卡罗仿真方法。随着计算机技术的飞速发展, 仿真技术也在迅速进步, 专门从事仿真技术研究的机构和学者也逐渐增多。1952 年, 美国成立了世界上第 1 个专门的仿真学术组织——计算机仿真学会(The Society for Computer Simulation, SCS); 1956 年, 美国又成立“国际数学和仿真计算机联合会(International Association for Mathematics and Computers in Simulation, IMACS)”。这 2 个学术组织的成立, 标志着仿真成为了一个独立的学科方向。随后很多机构和学者从不同角度对仿真进行了定义和描述, 表 1 给出几个有代表性的定义。

表 1 发展初期的建模仿真概念定义  
Tab. 1 Definitions of M&S in early stage

序号	定义	提出者	年份
1	仿真是一种在数字计算机上进行实验的数值方法。它用特定的数学逻辑模型来描述长生命周期下商务或经济系统的行为 <sup>[2]</sup>	T.H. Naylo	1966
2	仿真是利用数字模型来效仿系统的行为演变 <sup>[3]</sup>	美国兰德公司	1967
3	仿真是建立一个系统的数学逻辑模型并在计算机上对它进行实验推演 <sup>[4]</sup>	A.A.B. Pritsker	1974
4	建模仿真意指构建真实世界系统的模型并将其在计算机上运行模拟的复杂过程。具体而言, 建模主要处理现实系统和模型的关系, 仿真主要处理计算机和模型的关系 <sup>[5]</sup>	B.P. Zeigler	1976
5	计算机模型和仿真是尝试理解自然规律演化行为的工具。它们有助于科学的核心要素: 预测和规划 <sup>[6]</sup>	R.S. Lehman	1977

由表 1 可见, 在仿真技术发展的初期, 人们大多把仿真定义为基于计算机或数学模型的一种实验活动。计算机仿真一度成为仿真的代名词。

随着仿真应用领域的扩大, 仿真对象越来越复杂。人们意识到, 单纯的计算机仿真无法准确模拟真实系统的特性, 在许多复杂系统仿真中, 仍需要物理设备的配合。因此仿真的概念得到拓展, 将物理模型或物理效应设备重新纳入到仿真系统之中。而完全基于数字模型的数字仿真或计算机仿真, 则成为仿真技术的一个分支。1997 年, 美军提出嵌入式仿真概念, 即将仿真能力嵌入武器装备中, 并通过与武器装备中子系统的交互完成训练、任务排练、战场可视化、效果测试和评估等功能<sup>[7]</sup>。仿真系统与物理系统的融合进入一个新的阶段。

2000 年,“计算机仿真学会”更名为“国际建模仿真学会(The Society for Modeling & Simulation International, SCS)”,一方面是为了强调模型在仿真中的重要性,另一方面也可以避免“计算机仿真”限制人们对仿真技术的全面理解。因此,目前在仿真领域的主流文献中,建模和仿真常常同时出现,即“建模仿真(Modeling and Simulation, M&S)”,有时简称“仿真”。

2007 年,美国国防部对仿真的概念进行总结,将仿真定义为以模型(即系统、实体、现象或过程的物理、数学或其他逻辑表示)为基础,模拟真实世界过程或系统随时间的运行,以进行管理或技术决策<sup>[8]</sup>。2014 年,由中国仿真学会编写的《建模与仿真技术词典》将“仿真”定义为:仿真又称模拟,是基于模型的活动,即利用模型来复现实际系统中发生的某些本质过程,并通过对系统模型的实验来研究、分析、改进实际中存在或设计中的系统<sup>[9]</sup>。这里的模型既包含传统意义上的因果模型(机理模型),也包含非因果模型(神经网络模型,经验模型等)。

从模型角度来看(图 1),仿真的概念从完全使用物理模型的物理仿真(模拟),发展为完全基于数字模型的计算机仿真,又进一步演变为数字模型与物理模型相融合的建模仿真(M&S)。

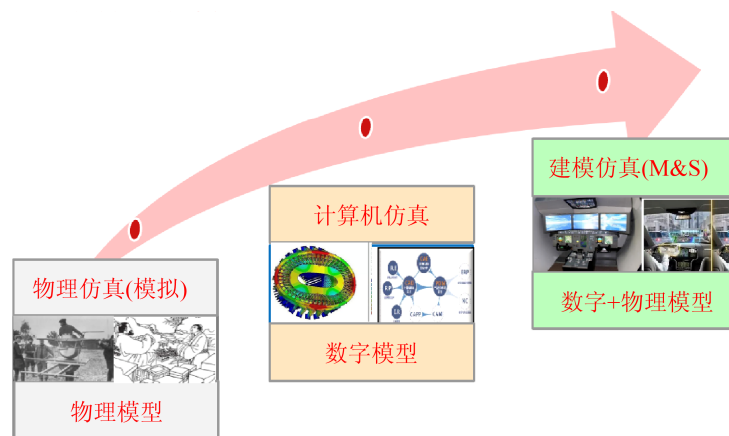


图 1 从模型角度看仿真的发展  
Fig. 1 Development of simulation

## 1.2 建模仿真的应用及重要性

仿真被认为是理论和实验之外的第 3 种认识世界的手段,它极大地拓展了人类认识世界和改造世界的能力,可以不受时空的限制,观察和研究已发生或尚未发生的现象,以及在各种假想条件下,研究现象发生和发展的过程,可以深入到一般科学技术及人类活动难以到达的宏观或微观世界去进行研究和探索。对于复杂系统或一些特殊领域而言,建模与仿真技术尤其能够发挥其独特的作用,有时甚至成为唯一的手段。

例如,美国利用建模仿真技术,在计算机中模拟核爆炸的内在机理与发生条件,使得在不进行真实核试验的情况下,确保了核武器库存安全与可靠长达 10 年以上<sup>[1]</sup>。

通过仿真进行军事演习,可以极大地降低演习的消耗,并避免人员的伤亡。2007 年美国进行了国土安全虚拟演习 Noble Resolve。该演习不仅提高了联合、联盟和跨部门培训演习的有效性,同时还大大降低了真实演习的成本,将各方面的损耗降低至 1%左右。

经过半个多世纪的发展,建模仿真技术的应用已经渗透到工业、农业、国防、经济、环境,甚至政治、社会、体育、文化娱乐等众多领域,在系统论证、试验、设计、分析、维护、人员训练等多个应用层次都成为了不可或缺的重要科学技术。

由于建模仿真技术的广泛应用性与突出重要性,2005年,美国国会众议院成立了国会建模与仿真专门小组(Congressional Modeling and Simulation Caucus),核心小组有大约40名成员。在该小组的推动下,美国众议院于2007年6月通过第487号决议,宣布“建模仿真”为“国家核心技术”(National Critical Technology)。2018年,美国进一步将“建模仿真”纳入新修订的《美国高等教育法<sup>[10]</sup>(Higher Education Act of 1965)》。

在制造领域,建模仿真是未来制造业的最重要的核心技术之一。建模仿真技术已被用于产品制造的整个生命周期,涉及:设计、生产、测试、维护、报废等。2000年,由美国国防部高级研究与计划局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)、商务部、能源部、国家科学基金会联合发布一项国家级制造业发展战略研究及推广计划:集成制造技术路线图(Integrated Manufacturing Technology Roadmapping, IMTR)<sup>[11]</sup>。该路线图提出制造业六大挑战,即精良高效、快速响应客户需求、全面互联、保持环境可持续性、进行知识管理和善于应用新技术,这些挑战对当今的制造业而言仍然适用,而建模仿真被列为应对这六大挑战的4类技术之一。

在军事仿真方面,有战争模拟、作战演练、装备使用和维修培训等应用场景,能节约经费、提高效率、保护环境、减少伤亡。因此,1997年美国国防部提出“基于仿真采办(Simulation Based Acquisition, SBA)”,即将仿真应用于武器装备全生命周期。在此之后,洛克希德·马丁的联合攻击战斗机(Joint Strike Fighter, JSF)项目(F35)引进了SBA的全新概念,使得设计时间减少50%,制造时间减少66%,维护支持时间减少50%。

## 2 数字孪生

### 2.1 概念的起源

业界通常认为数字孪生的概念是由美国密歇根大学 Michael Grieves 教授于2002年提出的,将其定义为“信息镜像模型 (Information Mirroring Model)”<sup>[12-13]</sup>。

而最早使用数字孪生(Digital Twin, DT)一词的正式文献,是美国宇航局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)于2010年发布的《建模,仿真,信息技术与处理路线图》。也正是因为NASA及美国军方的关注,数字孪生才引起业界的广泛兴趣。NASA在该报告中,将数字孪生描述为:针对车辆(运载工具)或系统的集成化的多物理、多尺度、概率仿真,它使用物理特性模型、传感器更新数据和飞行历史信息,形成飞行中的孪生对象的全生命周期的镜像<sup>[14]</sup>。报告同时给出了数字孪生的四大应用场景,即通过数字孪生实现飞行器发射前试飞、对飞行中的飞行器的实际状态进行镜像、对潜在灾难和损坏进行现场取证和分析诊断、对修改飞行任务参数的影响进行分析。

这些应用场景实际上是NASA太空飞行模拟器的应用场景。后来被西门子称为第1个数字孪生的也正是阿波罗13登月模拟器<sup>[15]</sup>。1970年4月13日,阿波罗13宇宙飞船在太空中发生服务舱液氧箱爆炸,通过地面的模拟器对救援计划进行实时仿真,宇航员根据地面演练形成的操作指令安全地返回了地面。



登月模拟器在这次救援中发挥了关键的作用。

登月模拟器是从飞行模拟器(Flight Simulator)发展而来,是最具代表性的一种仿真设备。早期的飞行模拟器基于纯物理模型,图 2 是为“安托瓦内特”单翼飞机设计的训练器(1910 年)。19 世纪 30 年代,美国林克公司生产出仪表飞行模拟器,被美国陆、海军航空队采用,之后,在第二次世界大战期间,林克公司生产了上万台“蓝盒子”飞行模拟器,标志着世界模拟训练工业的诞生。

随着计算机技术的发展,飞行模拟器已经具备了一定的数字化程度。上面提到的阿波罗 13 登月模拟器(图 3),就是在此基础上发展出来的特殊用途的飞行模拟器。到今天,飞行模拟器仍然是一种具有较高数字化程度的数字模型和物理装置相结合的仿真设备,还无法实现完全数字化。



图 2 早期的飞行模拟器

Fig. 2 Flight simulator in early stage

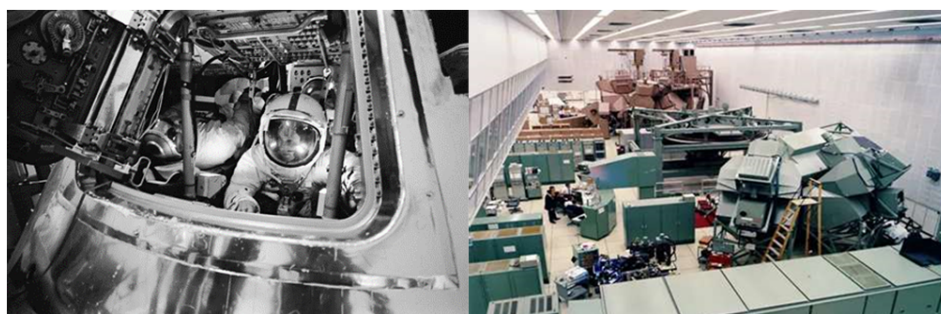


图 3 阿波罗 13 模拟器

Fig. 3 Apollo 13 simulator

可以看出, NASA 的数字孪生概念来源于其飞行模拟器,其核心是仿真,而构建一个如太空飞行模拟器这样的数字孪生系统是一项庞大的系统工程。因此在同一个报告里, NASA 将其数字孪生又称为“基于仿真的系统工程 (Simulation-Based System Engineering)”。

从 NASA 数字孪生的背景及其定义可以看出,其数字孪生事实上是一种数字模型和物理模型融合的综合系统。但人们更愿意将数字孪生描述为一种纯数字模型<sup>[12,16-18]</sup>,这和计算机仿真发展初期的情形有些类似。

与仿真中传统意义的模型相比,数字孪生最主要的特点是:模型通过传感器随时获取物理实体的数据,并随着实体一起演变,一起成熟甚至一起衰老。人们可以利用模型进行分析、预测、诊断或者训练,对物理对象进行优化和决策。这个过程是一种典型的仿真活动。面向数字孪生全生命周期(构建、演

化、评估、管理、使用)的技术可称为数字孪生技术(Digital Twin Technology)<sup>[19]</sup>。

## 2.2 数字孪生与仿真的关系

经过 60 多年的发展,针对不同的应用领域、研究对象以及技术特点,建模仿真发展出很多种类和分支,表 2 给出了建模仿真从不同维度的分类情况。通过这些分类,可以帮助我们更全面地理解数字孪生及其与仿真的关系。

按被仿真的对象可以分为:工程系统仿真,如产品设计仿真、制造过程仿真;自然系统仿真,如气候变化仿真、自然灾害仿真;社会系统仿真,如人工社会、经济行为仿真;生命系统仿真,如数字病人、人工生命;军事系统仿真,如多军种联合演习仿真。

按系统的特性可以分为连续系统仿真、离散系统仿真、定量系统仿真、定性系统仿真和混合系统仿真。

按仿真时间与自然时间的关系可以分为:实时仿真,即仿真运行时间与自然时间保持一致的仿真;欠实时仿真,即仿真运行时间慢于自然时间的仿真;超实时仿真,即仿真运行时间快于自然时间的仿真。

按仿真系统架可以分为:集中式仿真,即运行于单台计算机或单个平台上的仿真系统,适合中小型的仿真系统,便于设计和管理;分布式仿真,即运行于多台计算机或多个平台上的仿真系统,常用于大规模体系级仿真。

按仿真粒度可以分为:单元级仿真,即面向单个部分或领域的仿真,如机械结构仿真、控制仿真、流体仿真、电磁仿真;系统级仿真,面向单一系统整体行为的仿真,如汽车、飞机等产品的全系统仿真;体系级仿真(System of Systems),面向由多个独立系统组成的体系系统的仿真,关注体系中各部分之间的关系和体系的涌现行为,如城市交通仿真、体系对抗仿真。

按仿真用途可以分为供分析、预测、优化、决策用的工程仿真,以及操作培训或对抗演习用的训练仿真。

按仿真所用模型可以分为物理仿真、数字仿真和半物理仿真。

按仿真模式可以分为离线仿真和在线仿真。其中,在线仿真又可分为嵌入式仿真和非嵌入式仿真。

表 2 建模仿真技术的种类  
Tab. 2 Types of modeling and Simulation Technology

仿真对象	系统特性	时钟	架构	粒度	用途	模型	模式
工程	连续	实时	集中	单元	工程	物理	离线
自然	离散	欠实时	分布	系统	训练	数字	在线
社会	混合	超实时		体系		半物理	
生命	定量						
军事	定性						

注:其中正体部分是数字孪生也具有的分类属性

从表 2 可以看出,从模式和模型角度,数字孪生技术属于一种在线数字仿真技术,同时,数字孪生也可以适用于“对象、特性、时钟、架构、粒度、用途”这些分类下的所有情况,譬如可以是训练目的打造的分布式、超实时的体系级数字孪生。因此,借鉴建模仿真领域的现有技术体系可以更全面地了解数字孪生的应用范围。



### 3 数字孪生的评价指标

#### 3.1 逼真度和可信度

数字孪生本质上是一种模型。统计学家乔治·伯克斯有一句名言:“所有模型都是错的,但有些是有用的。”<sup>[20]</sup>因为任何一个模型都只能近似地描述客观对象的一部分特性,但是当我们难以直接对物理对象进行操作或分析时,模型似乎又是必不可少的。

只有在模型足够可信的情况下,我们才可以相信从模型所获取的知识,并用来指导对物理对象的改进和优化,或针对物理对象的决策。

在仿真领域,评价一个模型是否可信一般有 2 个指标:逼真度(Fidelity)和可信度(Credibility,也称置信度)。

逼真度反应对象客观特性,模型和真实对象“相像程度”。这个指标最早来源于对飞行模拟器(simulator)的评价,需要模拟器和被模拟对象尽可能像,才能提供足够的训练、评估价值。由于早期的模拟器是物理设备(现代模拟器虽然数字化程度越来越高,但仍然在一些关键环节使用物理设备),而将一个物理设备做得和另一个物理对象高度逼真,甚至完全相同,是有可能的,因此追求高逼真度是有意义的。NASA 习惯上使用高逼真度(high fidelity)来衡量其数字孪生的质量,也正是因为其数字孪生源于飞行模拟器的事实。由此我们有理由推测,NASA 的所谓数字孪生事实上是一种数字模型和物理模型相结合的混合模型系统。

但若将数字孪生理解为纯数字模型,那么追求“高逼真度”将会带来一系列问题。一方面,用数字模型“一模一样”地复制一个物理对象,是不现实的。另一方面,盲目追求数字模型逼近物理现实,会带来不必要的复杂性,从而降低模型可靠性、可计算性、可维护性等其他重要性能。

可信度则是根据仿真的具体目的和需求,来考察一个模型的可信任程度的指标。体现用户对于模型的信任程度。实际上,对一种需求有效的模型可能并不适用于另一种需求,也就是说,针对不同的仿真需求,同一个模型可能显示出不同的可信度。

模型的可信度分为功能性可信与非功能性可信。功能性可信指的是相较于实际的物理系统,模型在特定功能上表现出的准确程度。非功能性可信指的是模型的质量指标,如可用性、可靠性、准确性、完整度、成熟度和建模过程管理。对于数字模型而言,可信度更符合解决问题的一般规律,具有更强的现实意义和实用价值。一方面,可以在保证模型能满足仿真需求的前提下,避免不必要的复杂性。另一方面,对于以模拟结构或外观为主要目的仿真需求,可信度和逼真度是一致的。

目前,通常把数字孪生理解为纯数字模型的情况下,对它的评价指标应该采用可信度,而非逼真度。

#### 3.2 模型的成熟度

模型成熟度<sup>[21]</sup>是指随着使用时间和使用次数的增加,模型相对于实际对象的发展状态。模型成熟的过程是模型逐渐满足需求并逐渐趋于稳定的过程。

模型成熟度是对可信性的补充,反应了模型本身实用性程度。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。文献[21]定义了模型成熟度的 5 个等级(表 3)及相应的评估方法。在模型重用过程中,成熟度等级高的模型被选择的优先级要高于新开发的或者“未成熟”的模型。模型越

成熟，应用于仿真系统时的风险越小。

相较于传统模型，数字孪生模型随着实体对象一同演化，具有更强的动态性，因此模型成熟度对于数字孪生质量的评估具有重要的意义。

表 3 模型成熟度的等级划分<sup>[21]</sup>  
Tab. 3 Classification of model maturity

等级	级别名称	内涵
1	初级	建模过程非正规，缺少文档，模型未经校核和验证，未被规范管理，仿真失败较多
2	已验证级	建模过程规范化程度低，模型文档不完整，只进行内部校核和验证，管理不规范，仿真失败较少
3	可重用级	建模过程规范，文档齐全，模型经过专业校核、验证和确认，具有可接受的可信度，没有错误或问题导致故障或失灵。模型具有友好的接口，可以在不降低性能的情况下重新配置模型，模型采用模型库管理
4	协作级	建模过程具有较高的标准化程度。模型经过专业机构的验证、论证和认可，具有较高的可信度。模型具有友好的接口，符合特定领域的互操作性标准。该模式对异构环境有一定的适应性。在模型的使用过程中，很少有琐碎的问题。该模型可以很容易地重新配置，以满足不同的要求，而不会降低其性能。具有工程级的模型库，对模型管理完善
5	最优级	建模过程具有非常高的标准化程度。模型经过专业第三方机构的完全验证、验证和认可，具有较高的可信度和逼真度。模型的接口非常友好，能够适应不同的互操作标准。模型对异构环境具有较强的适应性。在使用模型的过程中，没有任何问题。模型可以很容易地重新配置和重建，以满足不同的要求，而不会降低其性能。模型采用商业级模型库和配套工具进行专业管理

### 3.3 数字孪生质量相关的其他指标

除了上述指标，一个理想的数字孪生模型还需要兼顾很多因素。数字孪生的生命周期包含分为 3 个重要阶段：构建、应用与重用，在每个阶段都需要采用相应的指标进行评价<sup>[22]</sup>。

在模型构建阶段，除了可信度/逼真度外，模型复杂度、标准化程度和模型开发能力成熟度对模型的质量都有重要的影响。其中模型开发能力成熟度是保障模型开发过程规范化从而保证模型质量的重要指标，类似于软件过程中的能力成熟度模型(Capability Maturity Model Integration, CMMI)，但由于模型的复杂性和多样性，模型开发能力成熟度需要考虑更多的因素，目前国内外尚缺乏相应的研究。在模型应用阶段，主要考察模型的解耦能力、并行化能力和容错能力等。在模型重用阶段，需要考察模型的可重构性、可配置性、可组合性、移植性等。另外，还有一些重要指标贯穿模型生命周期的不同阶段，除模型成熟度外，还包括全生命周期成本、模型对需求和环境的适应性等。

这些指标大都是独立于应用领域的共性指标，但针对不同的应用需求，各个指标的重要程度可能有所不同，需要根据实际情况进行考量。而对一些指标的评估方法特别是量化评估方法都还需要深入的研究。

## 4 基于模型工程的数字孪生构建

### 4.1 模型工程关键技术

构建一个可信的、高质量的数字孪生模型是开展各类数字孪生应用的核心和基础。模型工程可为数字孪生的构建提供重要的方法和保障。

保证所构建模型的高质量是一个系统工程，需要从事后的验证评估和建模过程的规范管理 2 方面入

手, 即通过实施模型工程, 保证模型构建、使用、维护、演化、重用等全生命周期各个阶段可信及满足其他相关指标的要求<sup>[23-24]</sup>。

模型工程是采用系统化、标准化、可量化的方法, 以最小的代价保证模型全生命周期可信和高质量的理论、方法、技术、标准及相关工具的总称。表 4 给出了模型工程的主要关键技术。

表 4 模型工程技术体系  
Tab. 4 Technology system of model engineering

模型构建	全生命周期管理	模型重用和共享	定量分析和评估	支撑技术
领域无关的建模方法	模型全生命周期过程的建模	模型库管理	模型可信性量化	模型验证、校核与确认(VV&A)
模型描述和建模语言	模型需求的获取与管理	模型即服务	分析和评估	数据/知识管理
模型相关标准	面向建模过程的能力成熟度模型	基于云的模型重用和共享	风险分析	模型及全生命周期过程的可视化
模型组合	模型工程的过程管理	模型重构和配置	成本分析	支撑环境/工具
.....	.....	模型成熟度	复杂性分析	.....
.....	.....	.....	.....	.....

## 4.2 数字孪生的构建

### 4.2.1 基本原则

基于建模仿真领域多年积累的经验, 构建一个可信的数字孪生, 需要遵循一些基本原则<sup>[22]</sup>:

(1) 面向需求建模。模型只能描述被研究对象某个方面的特性, 因此建模之前首先需要了解建模的目的和需求。不同的应用需求对应研究对象的不同特性, 它们决定了建模的方法、模型的结构、所要采集的数据等。因此, 面向不同的需求, 针对同一个对象可能构建出完全不同的模型。

(2) 模型尽量简单。在满足应用需求的条件下, 应使模型尽可能简单, 从而避免不必要的复杂性。复杂的模型不仅会损耗过多的计算资源, 同时也会增加计算过程的不确定性, 并且给模型的维护和重用带来麻烦。虽然技术的进步使我们处理复杂模型的能力有了很大提升, 但追求简单仍然是建模需要遵循的基本原则。

(3) 全生命周期统一考虑。站在模型全生命周期的角度考虑建模问题, 是模型工程的一个重要理念。特别对数字孪生而言, 其生命周期一般较长, 而且不同阶段(如模型构建、模型使用和模型演化)相互交错融合、相互影响, 因此, 在模型构建阶段需要同时考虑后续使用、重用、维护等阶段的要求, 从而保证模型在各个阶段都有最优的表现。

(4) 全面彻底的 VV&A。模型在每个阶段、每个环节都需要经过严格的验证、校核和确认(VV&A), 这在传统的仿真领域已经成为一条基本原则, 对于构建过程复杂、运行周期长、动态性强的数字孪生而言尤其重要。

### 4.2.2 数字孪生的构建框架

参考仿真模型生命周期过程<sup>[25]</sup>, 建议数字孪生构建可以采用如图 4 所示框架<sup>[22]</sup>。对仿真需求进行分析, 确定模型构建的基本要求, 通过概念建模、架构设计、模型设计、模型实现和集成共 5 个步骤完成模型构建。在构建过程中需要不断反向迭代, 确认是否每一步都满足前置需求。基础模型构建完毕后生成仿真结果, 与现实系统比对, 并根据采集到的实时数据进行同步更新。当系统发生重大变革或模型被

重用时，数字孪生将演化生成新版本的模型。所有生成的模型、过程模型与格式化的需求都会存入模型库/云池等待被重用。

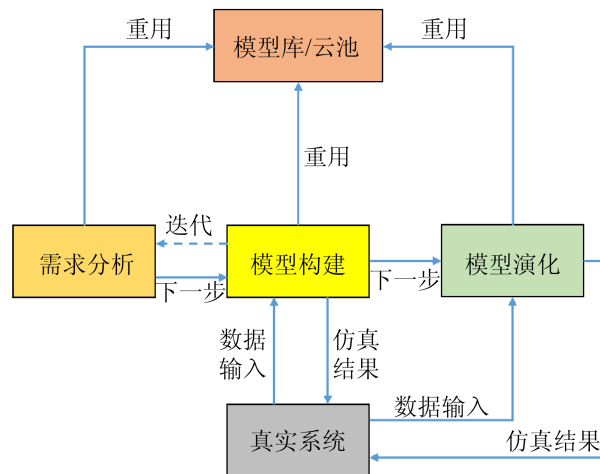


图 4 数字孪生的构建框架  
Fig. 4 Framework of digital twin

#### 4.2.3 需求分析

在需求分析阶段(图 5)，首先确认问题，也就是明确仿真的目的。然后用形式化的语言对问题进行描述，形成一系列清晰描述的形式化问题。最后，用需求工程的方法从中提炼出更本质的需求，并将其进行规范化表述，成为构建 DT 模型的重要基础。过程中所有环节都要经过 VV&A 验证，并进行反向迭代，以确保每一步都紧紧围绕着最初的目的，这 3 步都会产生描述性文件，并存入云池。



图 5 需求分析  
Fig. 5 Requirement analysis

#### 4.2.4 模型构建

在得到规范化需求后建立概念模型，该模型是最高层的抽象描述，它最接近建模仿真工程师的设计思想，用来确定高层概念架构和不同格式的知识。该过程可以参考文献[26]来实现。

为了实例化数字孪生模型，还需要结合规范化需求、概念模型及其架构，来进行模型的规范化设计。在规范化设计完成之后，就可以用类似 Arena, Simio 等仿真软件，或者 C 语言, C++, Java 或 Python 等编程语言来开发可执行的仿真子模型。当把所有子模型实现并集成起来后，就形成了完整数字孪生模型。

需要注意的是，数字孪生模型构建的全过程采用了并行开发的思想，由于这类模型，随时都在接收来自物理系统的数据，并实时更新模型的状态，因此模型的构建(设计、实施与集成)、使用和演化是融为一体的。从全生命周期优化的角度考虑，需要在设计阶段就让其他环节的实施者共同参与讨论，从而

保证模型的可实现、可维护、可重用等性能, 并降低全生命周期的总成本。例如, 在概念模型设计阶段, 我们需要兼顾考虑后置的模型架构、设计、实现以及集成, 因此后续 4 个阶段的工程师都要参与概念建模的开发。这条规则适用于数字孪生模型构建的所有环节。

并行开发有别于前述提到的反向“迭代”, 该迭代只是当某阶段的输入质量未达到该阶段要求时, 会向前溯源一个阶段, 修改或重建模型。但即使采用并行开发, 仍有必要保留迭代的过程, 因为并行开发仍难以 100% 保证各阶段模型的质量或消除所有不确定性。除此之外, 在模型构建阶段, 所有的模型活动不仅基于前置的输入, 还会基于真实系统实时采集的数据。

与需求分析阶段类似, 模型构建的各阶段的产出会存入云池, 以供重用。模型构建过程如图 6 所示。

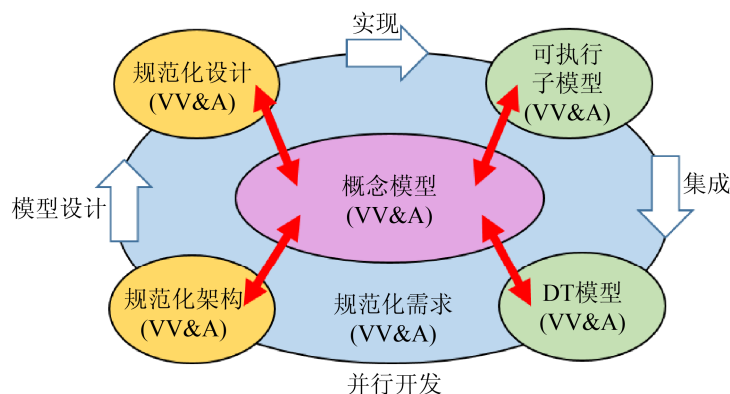


图 6 模型构建

Fig. 6 Process of model building

#### 4.2.5 数字孪生的演化

如前所述, 数字孪生的一个重要特征是, 它会根据采集到的系统数据, 不断自动演化更新。模型演化指的是模型在应用过程中, 结构或参数发生了变化, 从而形成不同版本的模型。传统的模型演化一般在模型管理阶段完成。而数字孪生模型演化则是根据来自物理对象的数据实时自动进行的, 以保证与物理对象的状态随时保持一致。根据演化程度的不同, DT 的演化可以分为 3 个层次:

(1) 最基本的演化是渐进适应的过程, 它使模型更加精确和可靠。在该过程中, DT 模型的参数、状态和模型功能以迭代和增量的方式不断更新, 模型质量会不断提高, 但不会产生新的模型。为了实现该过程, 需要在真实系统和基于历史数据的 DT 模型之间建立数据动态关联。通过增量学习和机器学习算法训练关联关系, 使模型属性逐渐接近系统的仿真需求。

(2) 当数字孪生模型的参数调整不能满足系统要求时, 模型则会根据实际需求进行重新配置, 从而生成新版本的模型。这个过程可以采用动态数据驱动的仿真(Dynamic Data-Driven Simulation)方法来实现, 如图 7 所示<sup>[27]</sup>。

该方法首先根据实际系统和仿真需求构建仿真模型, 这个模型可能并不准确。然后, 由传感器采集实际系统运行过程中的状态信息, 将这些实时的状态信息与仿真模型的输出数据进行数据同化(assimilation), 调整模型状态参数, 使模型输出的仿真结果保持与实际系统一致。

(3) 当仿真需求、问题场景发生变化, 或是将数字孪生模型作为一个新的复杂系统的组件被重用

时, 需要重新建立一个数字孪生模型来满足新的要求。新版本的数字孪生可以通过重构或是改造生成。改造的对象除了数字孪生本身, 也可以是其中间产品。该数字孪生及中间产品存储在模型库/云池中, 包括概念模型、架构规范、设计规范和可执行子模型等。重新配置或重构过程需要融合实际系统的实时状态数据。例如, 概念模型的重构配置不仅要考虑问题、形式化问题和需求规范, 还要把实际系统的实时信息作为输入, 产生新的概念模型。

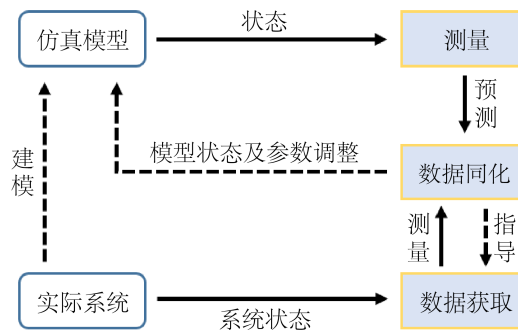


图 7 动态数据驱动的仿真  
Fig. 7 Dynamic data-driven simulation

## 5 结论与展望

随着与云计算、大数据、物联网、人工智能等新技术新理念的融合, 建模仿真正在进入一个新的发展阶段, 向着数字化、网络化、服务化、智能化方向发展。

数字孪生技术是建模仿真技术在制造领域的应用并与物联网、虚拟现实等技术相结合的产物, 在工业互联网浪潮的推动下, 得到迅速传播。数字孪生的概念由于形象通俗的特点而引发行业内的广泛关注和浓厚兴趣, 也使人们进一步认识了仿真技术的价值和重要性。但鉴于仿真技术的历史经验, 也应注意数字孪生概念的局限性。尽管随着新一代信息技术的快速发展, 数字化模型的表现能力越来越强, 仿真所用模型的数字化程度也越来越高。但是, 在现有科学技术体系下, 用纯数字模型百分之百地复现物理对象的所有特性, 仍然是不现实的。数字模型和物理模型的共存与协作将是一个长期的过程。即使只考虑物理对象中可以完全数字化的部分, 要想实现可以在全生命周期随物理系统实时演化的真正意义上的数字孪生, 也还有很长的路要走。

经过 60 多年的发展, 建模仿真形成了较为完善的理论、方法和技术体系, 这些将为数字孪生的研究和应用提供坚实的基础和有力的支撑。

### 参考文献:

- [1] H Res. 487. In the House of Representative[R]. U.S., 110th Congress, 2007.
- [2] Naylor T H, Balintfy J L, Burdick D S, et al. Computer Simulation Techniques[M]. New York and London: John Wiley, 1966.
- [3] Kiviat P J. Digital Computer Simulation: Modeling Concepts Memorandum[M]. California: The RAND Corporation, 1967.
- [4] Prisker A A B. The Gasp IV Simulation Language[M]. New York and London: John Wiley, 1974.
- [5] Zeigler B P. Theory of Modelling and Simulation[M]. New York and London: John Wiley, 1976.
- [6] Lehman R S. Computer Simulation and Modeling: an Introduction[M]. New York and London: John Wiley, 1977.
- [7] Bahr H A, Abate C W, Collins J R. Embedded Simulation for Army Ground Combat Vehicles[C]// 19th Interservice/Industry Training, Simulation and Education Conference. Orlando, Florida, December, 1997.

- [8] Department of Defense, DoD Modeling and Simulation (M&S) Management[K]. Directive Number 5000.59, August 8, 2007.
- [9] 中国仿真学会. 建模与仿真技术词典[M]. 北京: 科学出版社, 2018.  
China Simulation Federation. Dictionary of Modeling and Simulation Technology[M]. Beijing: Science Press, 2018.
- [10] Modeling and Simulation Programs. American Higher Education Act[R]. SEC.891, 20 U.S.C. 1161v.
- [11] Gene A, Hossein A, Perakath B, et al. Integrated Manufacturing Technology Roadmapping Project: Roadmap for Modeling & Simulation[R]. Integrated Manufacturing Technology Initiative, Inc, 2000.
- [12] Grieves M. Origins of the Digital Twin Concept[Z]. Florida Institute of Technology, August 2016. DOI: 10.13140/RG.2.2.26367.61609.
- [13] Grieves M. Product Lifecycle Management: Driving the Next Generation of Lean Thinking[M]. New York: McGraw-Hill, 2006.
- [14] Shafto Mike, Conroy M, Doyle R, et al. Modeling, Simulation, Information Technology and Processing Roadmap[R]. NASA, 2010.
- [15] Apollo 13: The First Digital Twin[EB/OL]. [2021-02-01]. <https://blogs.sw.siemens.com/simcenter/apollo-13-the-first-digital-twin/>.
- [16] Tuegel E. The Airframe Digital Twin: Some Challenges to Realization[C]// 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference 20th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference 14th AIAA. California: Palm Springs. 10.2514/6.2012-1812.
- [17] Boschert S, Rosen R. “Digital Twin—the Simulation Aspect” in Mechatronic Futures[M]. New York: Springer, 2016: 59-74.
- [18] Bielefeldt B, Hochhalter J, Hartl D. Computationally Efficient Analysis of SMA Sensory Particles Embedded in Complex Aerostructures Using a Substructure Approach[C]// ASME 2015 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems, American Society of Mechanical Engineers Digital Collection. USA: Colorado Springs, 2015.
- [19] 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. Calm Thinking About Digital Twin and its Modeling and Simulation Technology[J]. Journal of System Simulation, 2020, 32(4): 1-10.
- [20] Box G E P. Science and Statistics[J]. Journal of the American Statistical Association (S0162-1459), 1976, 71(356): 791-799.
- [21] Zhang L, Liu Y, Laili Y, et al. Model Maturity Towards Modeling and Simulation: Concepts, Index System Framework and Evaluation Method[J]. International Journal of Modeling, Simulation, and Scientific Computing (S1793-9623), 2019, 11(3): 2040001.
- [22] Zhang L, Zhou L F, Berthold K P H. Building A Right Digital Twin with Model Engineering[J]. Journal of Manufacturing System (S0278-6125), 2020, 59: 151-164.
- [23] 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.
- [24] Zhang L, Zeigler B P, Laili Y. “Introduction to Model Engineering for Simulation” in Model Engineering for Simulation[M]. Elsevier, 2019: 1-23.
- [25] Osman B. A Life Cycle for Modeling and Simulation[J]. Simulation: Transactions of the Society for Modeling and Simulation International (S0037-5497), 2012, 88(7): 870-883.
- [26] Chigani A, Balci O. The Process of Architecting for Software/System Engineering[J]. International Journal of System of Systems Engineering (S1748-0671), 2012, 3(1): 1-23.
- [27] Hu X. Dynamic Data Driven Simulation[J]. SCS M&S Magazine, 2011, 1: 16-22.