

数字孪生体 技术白皮书

(2019年12月)

安世亚太科技股份有限公司

数字孪生体实验室

编委会成员

田 锋

安世亚太公司高级副总裁，北京市综合仿真实验室主任，数字孪生体实验室主任。拥有二十多年研发、技术、管理与咨询经历，为近百家企业提供研发体系规划、建设和信息化咨询，是航空三大主机所、船舶工业某研究院、中车集团等企业的精益研发、知识工程、仿真体系等项目的总设计师，著有《精益研发 2.0》、《知识工程 2.0》、《制造业知识工程》等书籍。

段海波

博士，安世亚太公司咨询总工程师，数字孪生体实验室北美分部主任。INCOSE CSEP (2017)，MATRIZ 三级认证 (2005)；ISO/TC184/SC4、SAC/TC159/SC4 和 SAC/TC28/SC7 委员。

杨振亚

安世亚太公司仿真业务部总经理，中国化工学会过程模拟及仿真专业委员会委员。长期从事计算机辅助设计 (CAE) 软件的技术支持、项目咨询和产品管理工作，在仿真软件 (Fluent, CFX, Flownex, Twinmesh, Rocky 等) 的技术应用方面积累了丰富的经验。

丁 杰

安世亚太战略合作部副总经理，数字孪生体实验室顾问。六西格玛黑带、TOGAF 高级认证 (2015)，美国质量协会 ASQ 和企业架构联盟 AEA 会员。二十余年制造业管理咨询、信息化规划和实施，三年增材制造生态圈战略合作经营经验。

陈志强

安世亚太战略合作部咨询顾问。二十年企业管理咨询和信息化规划，三年增材制造生态圈业务拓展。在企业质量管理、供应链管理、企业管理体系规划等方面积累了丰富的丰富经验。

编写顾问

胡 权

工业 4.0 研究院院长兼首席经济学家，开源工业互联网联盟暨数字孪生体联盟理事长。关注第四次工业革命的经济基础、竞争规律和商业模式的研究，涉及工业 4.0、智能制造、工业互联网、人工智能和数字孪生体等先进技术及应用，目前研究重点在通用目的技术。

编者按

这几年，数字孪生体的概念炙手可热，越来越成为从工业到产业、从军事到民生各个领域的智慧新代表。

在工业界，无论智能制造还是工业 4.0，这些智能化体系都需要网络化和数字化两只轮子来支撑。在中国，工业互联网已成为其中一只，而数字孪生体将成为另外一只。

数字孪生体将撑起数字化之轮，但又不止于数字化。数字孪生体的突破在于：它不仅仅是物理世界的镜像，也要接受物理世界的实时信息，更要反过来实时驱动物理世界，而且进化为物理世界的先知、先觉甚至超体。这个演变过程称为成熟度进化，即一个数字孪生体的生长发育将经历数化、互动、先知、先觉和共智等几个过程。这里首先要强调互动，因为没有实时互动，数字世界和物理世界之间其实是伪孪生。其次，我们提出“数字孪生体是仿真应用新巅峰”这一论断，因为在数字孪生体成熟度进化的每个过程中，仿真都扮演着不可或缺的角色，另外，我们还提出将“共智”作为数字孪生体的理想态。人类认知所限，物理世界各物件是否在“共智”我们不得而知，但数字世界提供了无限便利以实现“共智”，让我们可以把数字孪生体的价值挖掘到极致。

数字孪生体的应用绝不止于工业，我们应以更抽象的层次总结架构和技术，以更广阔的视角来观察场景和案例。本白皮书的第一部分关注对数字孪生体的抽象和总结。无论是参考架构、成熟度模型还是关键技术，都以“放之四海皆准”为原则。其余的章节，我们分别在工业、产业、民生和军事等四个领域分别选择了最关键的场景做实例化论述：数字孪生制造、数字孪生产业、数字孪生城市和数字孪生战场。

田 锋

安世亚太公司 高级副总裁

数字孪生体实验室 主任

2019年12月20日

目 录

编者按.....	1
一、 数字孪生体发展综述.....	1
二、 数字孪生体的定义.....	6
三、 数字孪生体的模型.....	10
(一) 数字孪生体的概念模型.....	10
(二) 数字孪生系统参考架构.....	11
(三) 数字孪生体的应用框架.....	12
(四) 数字孪生体成熟度模型.....	13
四、 数字孪生体的关键技术.....	16
(一) 建模.....	16
(二) 仿真.....	19
(三) VR、AR 及 MR.....	21
(四) 数字线程.....	22
(五) 系统工程与 MBSE.....	24
(六) 物联网.....	25
(七) 云、雾与边缘计算.....	26
(八) 大数据与机器学习.....	28
(九) 区块链.....	28
五、 数字孪生制造.....	31
(一) 现状.....	31
(二) 综述.....	31
(三) 数字孪生制造参考架构.....	32
(四) 数字孪生制造的关键技术.....	35
(五) 数字孪生制造的典型应用场景.....	41
(六) 数字孪生制造的典型应用案例.....	43
六、 数字孪生产业.....	49
(一) 现状.....	49
(二) 综述.....	55

(三) 数字孪生产业参考架构	57
(四) 数字孪生产业的关键技术	61
(五) 数字孪生产业的典型应用场景	65
(六) 数字孪生产业的典型应用案例	75
七、 数字孪生城市	79
(一) 现状	79
(二) 综述	80
(三) 数字孪生城市参考架构	81
(四) 数字孪生城市的关键技术	84
(五) 数字孪生城市的典型应用场景	92
(六) 数字孪生城市的典型应用案例	100
八、 数字孪生战场	105
(一) 现状	105
(二) 综述	106
(三) 数字孪生战场参考架构	108
(四) 数字孪生战场的关键技术	112
(五) 数字孪生战场的典型应用场景	118
(六) 数字孪生战场的典型应用案例	125
九、 数字孪生体标准化进展	132
(一) 标准化相关活动	132
(二) 相关标准研发进展	133
十、 结论	134
参考文献	135

一、数字孪生体发展综述

当前，以物联网、大数据、人工智能等新技术为代表的数字浪潮席卷全球，物理世界和与之对应的数字世界正形成两大体系平行发展、相互作用。数字世界为了服务物理世界而存在，物理世界因为数字世界变得高效有序。在这种背景下，数字孪生体技术应运而生。

数字孪生体最早的概念模型（图 1）由当时的 PLM 咨询顾问 Michael Grieves 博士（现任佛罗里达理工学院先进制造首席科学家）于 2002 年 10 月在美国制造工程协会管理论坛上提出。数字孪生体（Digital Twin）这一名称最早出现在美国空军实验室 2009 年提出的“机身数字孪生体（Airframe Digital Twin）”概念中。2010 年，NASA 在《建模、仿真、信息技术和处理》和《材料、结构、机械系统和制造》两份技术路线图中直接使用了“数字孪生体（Digital Twin）”这一名称。2011 年 Michael Grieves 博士在其新书《虚拟完美（Virtually Perfect: Driving Innovative and Lean Products through Product Lifecycle Management）》中引用了 NASA 先进材料和制造领域首席技术专家 John Vickers（现任马歇尔中心材料与工艺实验室副主任和 NASA 国家先进制造中心主任）所建议的“数字孪生体（Digital Twin）”这一名称，作为其信息镜像模型（图 1）的别名。2013 年，美国空军将数字孪生体和数字线程作为游戏规则改变者列入其《全球科技愿景》。

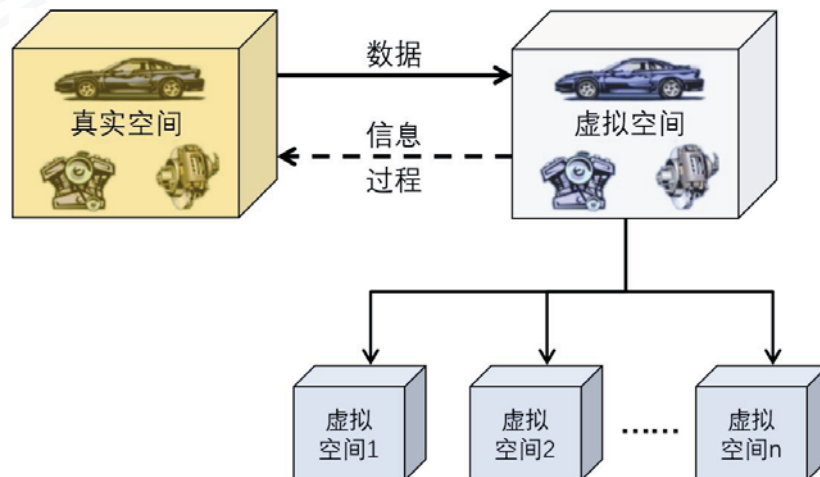


图 1 数字孪生体最初概念模型及其术语名称的前身——PLM 的概念化理想

回顾数字孪生体的发展历程(图2),可以看到航天发射任务和航空武器装备研制的需求拉动作用,也可以看到建模、仿真、系统工程等的技术推动作用。总结数字孪生体的发展历程,可以分为四个阶段:

(1) 1960-世纪之交,是数字孪生体的技术准备期,主要是指CAD/CAE建模仿真、传统系统工程等预先技术的准备。

(2) 2002-2010,是数字孪生体的概念产生期,指数字孪生体模型的出现和英文术语名称的确定。这段时间,预先技术继续成熟,出现了仿真驱动的设计、基于模型的系统工程(MBSE)等先进设计范式。

(3) 2010-2020,是数字孪生体的领先应用期,主要指NASA、美军方和GE等航空航天、国防军工机构的领先应用。这段时间也是物联网、大数据、机器学习、区块链、云计算等外围使能技术的准备期。目前数字孪生体的定义不下20个,大部分IT厂商、工业巨头和咨询机构都有自己的定义或与自身业务相关的数字孪生体解决方案。从2018年开始,ISO、IEC、IEEE三大标准化组织陆续开始着手数字孪生体相关标准化工作,ISO第一个数字孪生体国际标准将于明年发布。

(4) 2020-2030,是数字孪生体技术的深度开发和大规模扩展应用期。从图2可以看出,PLM领域,或者说以航空航天为代表的离散制造业,是数字孪生体概念和应用的发源地。目前,数字孪生体技术的开发正与上述外围使能技术深度融合,其应用领域也正从智能制造等工业化领域向智慧城市、数字政府等城市化、全球化领域拓展。

Gartner公司认为数字孪生体技术目前正在进入主流应用。2017年数字孪生体出现在Gartner新兴技术成熟度曲线的上升段,2018年到达曲线顶点。2019年未出现在曲线中,标志着它已不再是新兴技术,而是进入主流技术行列。而且,数字孪生体技术不是一般的新兴技术或主流技术。它从2017年到2019年,连续三年入选Gartner十大战略技术趋势。战略技术趋势意味着具有重大颠覆性潜力的趋势,正在从新兴状态中发展壮大,有望产生更广泛的影响及应用范围,或者正在以巨大的波动性迅速增长,并预计能够在未来五年内跨越新兴技术成熟度曲线的低谷到达成熟应用的平台期。

2019年2月Gartner公司发布调查和预测,实施物联网的组织中,有13%已经在使用数字孪生体,而62%的组织正在建立数字孪生体或正在计划这样做;预计到2022年,实施物联网的公司超过2/3将使用数字孪生体,乐观估计,甚至

在 2020 年就会达到这一比例。“我们看到各种组织都在采用数字孪生体，但使用物联网实现了产品互联的制造商是进步最快的。数字孪生体采用率快速增长的原因，一方面归因于供应商的市场培育，更要归因于业界对于数字孪生体提升业务价值的共识，进而将其纳入企业物联网和数字化转型战略”。

更进一步，Gartner 公司 2020 年十大战略技术中的第一项——超自动化（指通过多种机器学习、软件和自动化工具的打包组合来完成工作）认为，在模型驱动的组织基础上，实现组织的数字孪生体是获得超自动化全部收益的预先要求和前提；2019 年 7 月，Gartner 公司发布数字政府技术成熟度曲线，“政府的数字孪生体”出现在曲线的起点；2019 年 9 月，美国召开首次智慧城市和数字孪生体融合研讨会。这些事件标志着数字孪生体技术从现在开始进入深度开发和大规模扩展应用期。

以更大的视角回望人类历史的历次工业革命，表 1 选取工业化的视角，引入技术经济学中的“通用目的技术”这一概念，来分析数字孪生体技术在即将到来的第四次工业革命中的地位和作用。通用目的技术（GPT）是指一种单一的通用技术，在其整个生命周期中都具有以下公认四个特征：(1) 最初有很大的改进余地；(2) 最终被广泛使用；(3) 具有多种用途；(4) 并具有许多溢出效应。目前普遍认为，蒸汽机、电和内燃机、计算机分别是头三次工业革命的 GPT。人工智能将成为第四次工业革命的 GPT。数字孪生体技术满足 GPT 的四个充分必要条件，本白皮书认为数字孪生体技术也将成为第四次工业革命的通用目的技术。

表 1 数字孪生体在第四次工业革命中的地位和作用

工业革命	第一次 (1750-1850)	第二次 (1850-1950)	第三次 (1950-2020)	第四次 (2020-2080?)
特点/名称	机械化 /机械时代	电气化 /电气时代	数字化 /信息时代	智能化 /智能时代
理论基础	机械还原论	能量守恒	控制论+系统论 +信息论	量子理论
典型观点	人是机器	永动机不可行	信息是用来消除 不确定性的东西	万物源自比特
能量源	煤	电力	核能	可再生能源/ 可控核聚变
动力装置	蒸汽机	内燃机/电动机	核动力/喷气推进	(待发明)
信息传输 处理	信号旗/塔	电报/电话/ 无线电	电子计算机	量子通信/计算
设计范式	手工作坊 ->单人	单人->小团队	传统系统工程	基于 数字孪生体 的现代系统工程

工业革命	第一次 (1750-1850)	第二次 (1850-1950)	第三次 (1950-2020)	第四次 (2020-2080?)
制造范式	原始等材/减材	现代减材/等材	现代减材/等材	基于 数字孪生体 和增材思维的工艺融合
生产管理	单台机器生产	基于装配流水线的大规模生产	基于计算机的自动化生产	基于 数字孪生体 和工业互联的智能工厂
通用目的技术	蒸汽机	电/内燃机	计算机/互联网	AI/ 数字孪生体 /IoT

数字孪生体为跨层级、跨尺度的现实世界和虚拟世界建立了沟通的桥梁，是第四次工业革命的通用目的技术和核心技术体系之一，是支撑万物互联的综合技术体系，是数字经济发展的基础，是未来智能时代的信息基础设施。接下来的十年（21世纪20年代）将成为“数字孪生体时代”。在第四次工业革命进程中，数字孪生体将贯穿城市化、全球化和工业化的方方面面，成为遍在的数字孪生体（图3）。

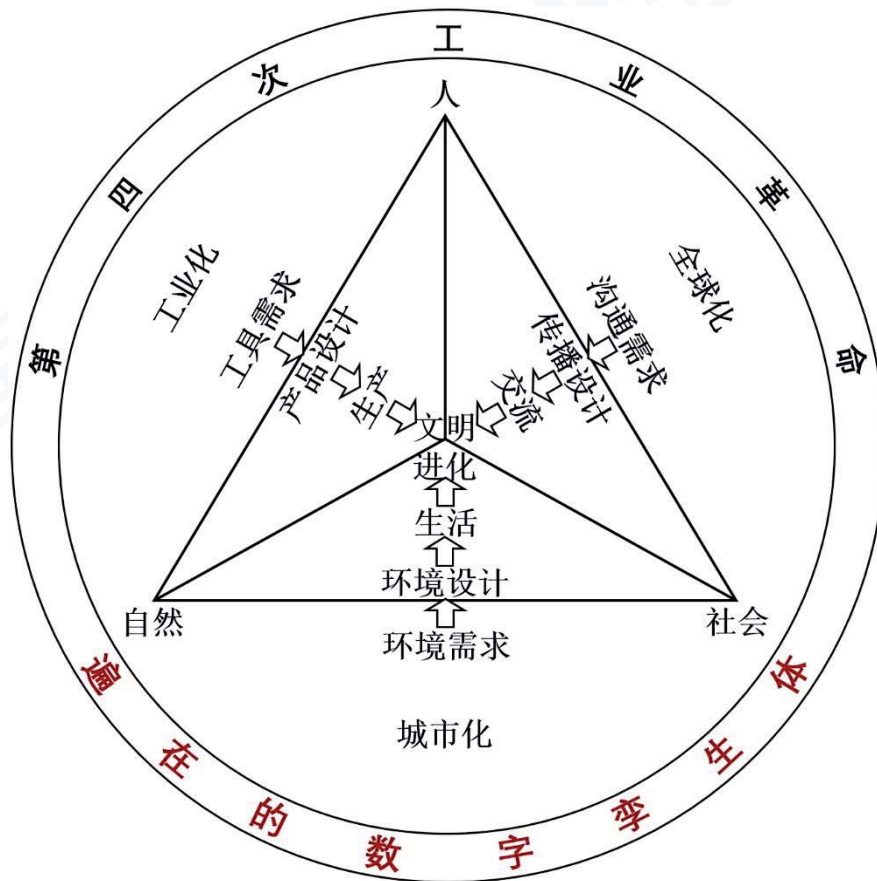


图 3 数字孪生体在第四次工业革命进程中的遍在性

二、数字孪生体的定义

表 2 汇总了从 2009 年美国空军实验室提出机身数字孪生体到 2019 年 ISO 23247 面向制造的数字孪生系统框架标准草案这十年间数字孪生体相关的重要定义和解释。

表 2 数字孪生体业界重要定义和解释汇总 (14 家)

提出者	英文定义或解释	中文定义	时间
AFRL	Airframe Digital Twin is an integrated system of data, models, and analysis tools to represent an airframe over its entire life cycle to provide actionable information for making decisions now (diagnosis) and for the future (prognosis) on a fleet-wide and individual tail number basis considering all sources of uncertainty.	机身数字孪生体 是一个由数据、模型和分析工具构成的集成系统。该系统不仅可以在整个生命周期内表达飞机机身,并可以依据非确定信息对整个机队和单架机身进行决策,包括当前诊断和未来预测。	2009
NASA	A digital twin is an integrated multi-physics, multi-scale, probabilistic simulation of a vehicle or system that uses the best available physical models, sensor updates, fleet history, etc., to mirror the life of its flying twin.	数字孪生体 是一个集成了多物理场、多尺度和概率仿真的数字飞行器(或系统),它可以通过逼真物理模型、实时传感器和服役历史来反映真实飞行器的实际状况。	2010
Dr. Michael Grieves	A virtual product is a use-specific informational or bit-based representation and its associated rule-based environment of a physical or atom-based product and its natural behavior. Virtualization: Creating an informational or bit-based representation of a physical or atom-based product. The Information Mirroring Model (IMM) as a framework for conceptualizing PLM and explored the implications of the duality of physical and virtual products. The ability to use virtual products in place of their physical counterparts drives the value of the IMM.	虚拟产品 是与某种特定用途相关的基于比特的信息化表达,和基于原子的物理产品及其自然行为所构成的基于规则的关联环境。 虚拟化 是为基于原子的物理产品创建基于比特的信息化表达的过程。 信息镜像模型 作为概念化 PLM 的框架,揭示了物理产品和虚拟产品二元性的含义。使用虚拟产品代替物理产品的能力体现了的信息镜像模型的价值。	2011
NASA/AF OSR	A Digital Twin is an integrated multiphysics, multiscale, probabilistic simulation of an as-built vehicle or system that uses the best available physical models, sensor updates, fleet history, etc., to mirror the life of its corresponding flying twin.	数字孪生体 是一个集成了多物理场、多尺度和概率仿真的数字飞行器(或系统),它可以通过逼真物理模型、实时传感器和服役历史来反映真实飞行器的实际状况。	2012

提出者	英文定义或解释	中文定义	时间
USAF	Digital Twin , a virtual representation of the system as an integrated system of data, models, and analysis tools applied over the entire life cycle on a tail-number unique and operator-by-name basis.	数字孪生体 是系统的虚拟表达,作为实际运行的单个系统实例在整个生命周期中应用的数据、模型和分析工具的集成系统。	2013
DoD	Digital Thread : An extensible, configurable and component enterprise-level analytical framework that seamlessly expedites the controlled interplay of authoritative technical data, software, information, and knowledge in the enterprise data-information-knowledge systems, based on the Digital System Model template, to inform decision makers throughout a system's life cycle by providing the capability to access, integrate and transform disparate data into actionable information. Digital Twin : An integrated multi-physics, multi-scale, probabilistic simulation of an as-built system, enabled by Digital Thread, that uses the best available models, sensor information, and input data to mirror and predict activities/performance over the life of its corresponding physical twin.	数字线程 : 一个可扩展、可配置和组件化的企业级分析框架,基于数字系统模型的模板,可以无缝加速企业数据信息知识系统中授权技术数据、软件、信息和知识的受控交互,通过访问和集成不同数据并转换为可操作信息,可在系统整个生命周期中为决策者提供支持。 数字孪生体 : 数字线程支持的已建系统的多物理场、多尺度和概率集成仿真,通过使用最佳可用模型、传感器更新和输入数据来镜像和预测其对应物理孪生体全生命期内的活动和性能。	2014
GE	Digital twins are software representations of assets and processes that are used to understand, predict, and optimize performance in order to achieve improved business outcomes. Digital twins consist of three components: a data model, a set of analytics or algorithms, and knowledge.	数字孪生体 是资产和过程的软件表达,用于理解、预测和优化性能以改进业务产出。数字孪生体由三部分组成:数据模型、一组分析方法或算法以及知识。	2015
PTC	A digital twin is a function of things (the devices and products generating data), connectivity (working to bring networks together), data management (cloud computing, storage, and analytics), and applications. As such, they likely will figure heavily into the construction and logic of IoT platforms.	数字孪生体 是由物(产生数据的设备和产品)、连接(搭接网络)、数据管理(云计算、存储和分析)和应用构成的函数。因此,它将深度参与物联网平台的定义与构建。	2015
Dr.	the Digital Twin is a set of virtual	数字孪生体 是一组虚拟信息结	2016

提出者	英文定义或解释	中文定义	时间
Michael Grieves & John Vickers	information constructs that fully describes a potential or actual physical manufactured product from the micro atomic level to the macro geometrical level. At its optimum, any information that could be obtained from inspecting a physical manufactured product can be obtained from its Digital Twin. Digital Twins are of three types: Digital Twin Prototype (DTP) , Digital Twin Instance (DTI) and Digital Twin Aggregate (DTA) . DT's are operated on in a Digital Twin Environment (DTE) .	构,可以从微观原子级别到宏观几何级别全面地描述现有或将有的物理制成品。在最佳状态下,可以通过数字孪生体获得任何实测得到的物理制成品的信息。数字孪生体有三种类型: 数字孪生原型体 、 数字孪生实例体 和 数字孪生聚合体 。而 数字孪生环境 则是数字孪生体的操作环境。	
德勤	A digital twin can be defined, fundamentally, as an evolving digital profile of the historical and current behavior of a physical object or process that helps optimize business performance.	数字孪生体 是某一物理实体(或过程)的历史和当前行为的数字化描述。这是一种持续进化的描述,有助于优化业务绩效。	2017
IBM	A digital twin is a virtual representation of a physical object or system across its lifecycle, using real-time data to enable understanding, learning and reasoning.	数字孪生体 是对物理对象或系统在全生命周期内的虚拟表达,并通过使用实时数据实现理解、学习和推理。	2017
佐治亚理工	A Smart City Digital Twin is a smart, IoT-enabled, data-rich virtual platform of a city that can be used to replicate and simulate changes happening in the real city to improve resilience, sustainability, and livability.	智慧城市数字孪生体 是一个智能的、支持物联网、数据丰富的城市虚拟平台,可用于复制和模拟真实城市中发生的变化,以提升城市的弹性、可持续发展和宜居性。	2017
SAP	A digital twin is a virtual representation of a physical object or system – but it is much more than a high-tech lookalike. Digital twins use data, machine learning, and the Internet of Things (IoT) to help companies optimize, innovate, and deliver new services.	单个 数字孪生体 是物理对象或系统的虚拟表达,但不仅仅是高科技外观。众多数字孪生体使用数据、机器学习和物联网来帮助企业优化、创新和提供新服务。	2018
ISO CD 23247	Digital Twin : fit for purpose digital representation of some realized thing or process with a means to enable convergence between the realised instance and digital instance at an appropriate rate of synchronisation.	数字孪生体 : 是现实事物(或过程)具有特定目的的数字化表达,并通过适当频率的同步使物理实例与数字实例之间趋向一致。	2019

分析和参考上述美军方和各企业的定义后,本白皮书给出数字孪生体的定义

如下：数字孪生体是现有或将有的物理实体对象的数字模型，通过实测、仿真和数据分析来实时感知、诊断、预测物理实体对象的状态，通过优化和指令来调控物理实体对象的行为，通过相关数字模型间的相互学习来进化自身，同时改进利益相关方在物理实体对象生命周期内的决策。

本白皮书将“Digital Twin”译为“数字孪生体”。加上这个“体”字，是为了借用了中文“体”字语义的模糊性来应对和减少 Digital Twin 译成中文时在不同使用场景下的不确定性。“体”字的中文语义的模糊性表现在它有两种含义：

1. 事物的本身或全部，如物体、实体 (object, entity)；
2. 事物的格局或规矩，如体制、体系。中文中，体系一词也是多义词：(a) 系统 (system)，如技术体系；(b) 系统之系统 (system of systems)，如体系工程。

为数字孪生加上“体”字后，数字孪生体就是一个名词，这样为 digital(ly) twinned/twinning 的翻译腾挪出了空间，方便相关术语体系的构建。因此，“数字孪生体”这个术语有如下几种使用场合和含义：

1. Digital Twin 这一现象背后所包含的技术体系、所代表的跨学科工程领域，以及作为通用目的技术引发的商业、经济和社会影响体系，如数字孪生体时代。
2. 物理实体对象的某种数字化孪生模型的抽象类型或实例，如数字孪生体可分为数字孪生原型体、数字孪生实例体和数字孪生聚合体(详见第三章第一节)。
3. 具体应用场景下物理实体对象的数字化孪生模型，如某个或某类产品、工厂、城市、产业、战场等的数字孪生体。此时，如果是强调物理实体对象或者物理实体与数字孪生体并重，也可将数字孪生作为形容词定语，放在物理实体对象之前，而不用“体”字，相当于英文的 digitally twinned。例如，数字孪生制造、数字孪生城市等。
4. 在某些物理实体与数字孪生体并重的场合，如架构设计或实现等，可将数字孪生体与对应物理实体对象及相关使能实体对象所构成的系统称为数字孪生系统。

三、数字孪生体的模型

一项新兴技术或一个新概念的出现，术语定义是后续一切工作的基础。在给出数字孪生体的文字定义并取得共识后，需要进一步开发基于自然语言定义的数字孪生体的概念模型，进而制定数字孪生体的术语表或术语体系。然后，需要根据概念模型和应用需求，开发数字孪生体的参考架构及其应用框架和成熟度模型，用来指导数字孪生体具体应用系统的设计、开发和实施。这个过程也是数字孪生体标准体系中底层基础标准（术语、架构、框架、成熟度等）的制定过程（图4）。

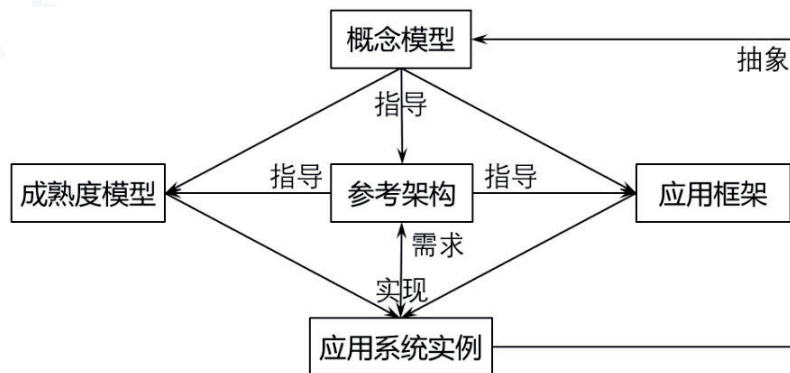


图4 概念模型、参考架构、应用框架、成熟度模型之间的关系

（一）数字孪生体的概念模型

基于第二章给出的数字孪生体文字定义，图5给出数字孪生体的概念模型。图中粗实线代表继承和泛化关系，细实线代表属性关系，虚线代表可选属性关系。左下角深蓝色是实体相关概念，左上角绿色是实体所在域的相关概念，右半边棕色是数字孪生体相关概念，右上角红色是数字线程相关概念，其余分布在中间、左边和底部的紫色是用于数字孪生体应用场景扩展的相关概念。本模型有以下特点和考虑：

- 基本认同 Michael Grieves 博士对数字孪生体的分类；
- 认同业界关于数字孪生体与物联网密不可分的观点；
- 认同美军方对数字线程的定义；
- 认同业界关于数字线程是数字孪生体关键使能技术的观点，将数字线程纳入数字孪生体的概念模型。

另外，本模型从第四次工业革命的宏大视角出发，不局限于人工物理系统（如智能产品、数字化车间）的数字孪生场景，而是将数字孪生的对象扩展到包含社会系统在内的全部物理实体，并考虑从微观到宏观的各种尺度和从元素到体系的

各种层次, 将工业化、城市化和全球化的各种需求和应用场景都包含其中, 为数字孪生体的参考架构开发和应用场景扩展提供了依据。

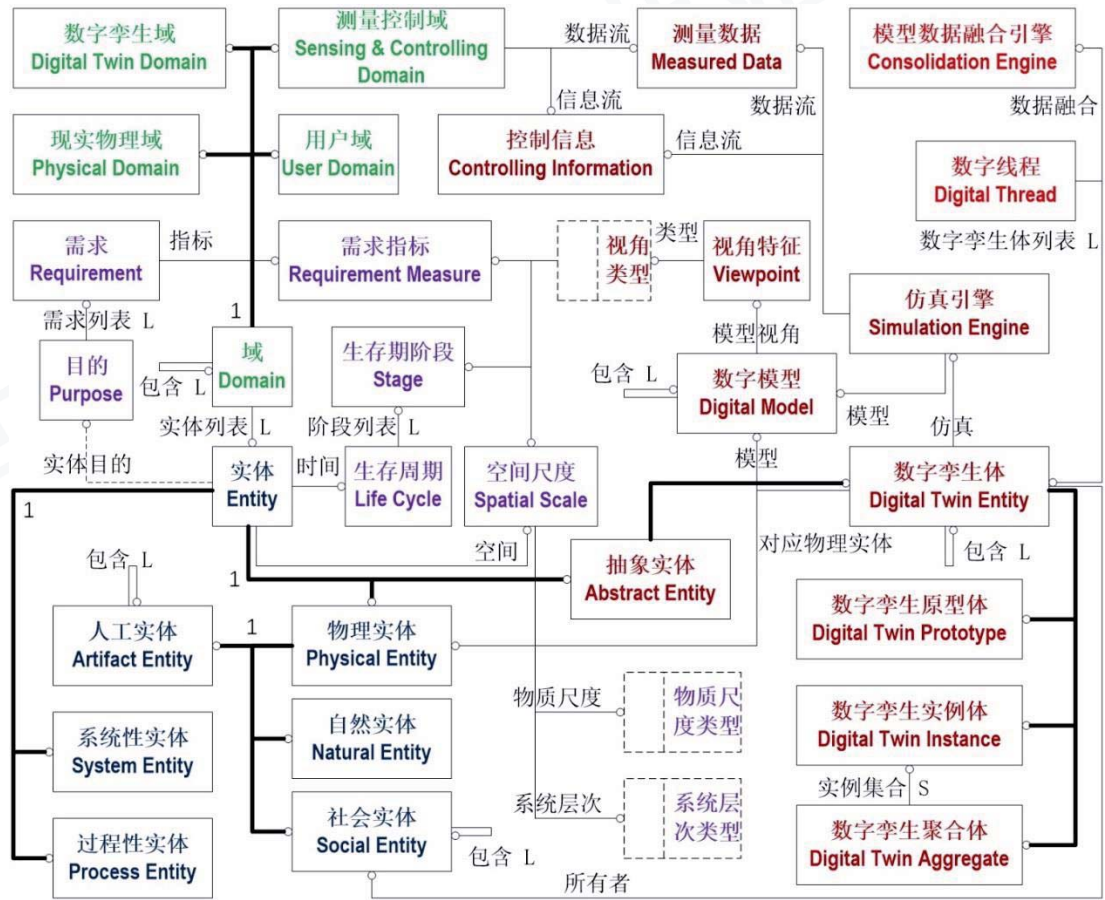


图 5 数字孪生体的概念模型

(二) 数字孪生系统参考架构

基于数字孪生体的概念模型 (图 5), 并参考 GB/T 33474-2016 和 ISO/IEC 30141:2018 两个物联网参考架构标准以及 ISO 23247 (面向制造的数字孪生系统框架) 标准草案, 图 6 给出了数字孪生系统的通用参考架构。一个典型的数字孪生系统包括用户域、数字孪生体、测量与控制实体、现实物理域和跨域功能实体共五个层次。

第一层 (最上层) 是使用数字孪生体的用户域, 包括人、人机接口、应用软件, 以及其他相关数字孪生体 (本白皮书称之为共智数字孪生体, 可简称共智孪生体)。

第二层是与物理实体目标对象对应的数字孪生体。它是反映物理对象某一视角特征的数字模型, 并提供建模管理、仿真服务和孪生共智三类功能。建模管理涉及物理对象的数字建模与展示、与物理对象模型同步和运行管理。仿真服务包

括模型仿真、分析服务、报告生成和平台支持。孪生共智涉及共智孪生体等资源的接口、互操作、在线插拔和安全访问。建模管理、仿真服务和孪生共智之间传递实现物理对象的状态感知、诊断和预测所需的信息。

第三层是处于测量控制域、联接数字孪生体和物理实体的测量与控制实体，实现物理对象的状态感知和控制功能。

第四层是与数字孪生体对应的物理实体目标对象所处的现实物理域。测量与控制实体和现实物理域之间有测量数据流和控制信息流的传递。

测量与控制实体、数字孪生体以及用户域之间的数据流和信息流动传递，需要信息交换、数据保证、安全保障等跨域功能实体的支持。信息交换通过适当的协议实现数字孪生体之间交换信息。安全保障负责数字孪生系统安保相关的认证、授权、保密和完整性。数据保证与安全保障一起负责数字孪生系统数据的准确性和完整性。

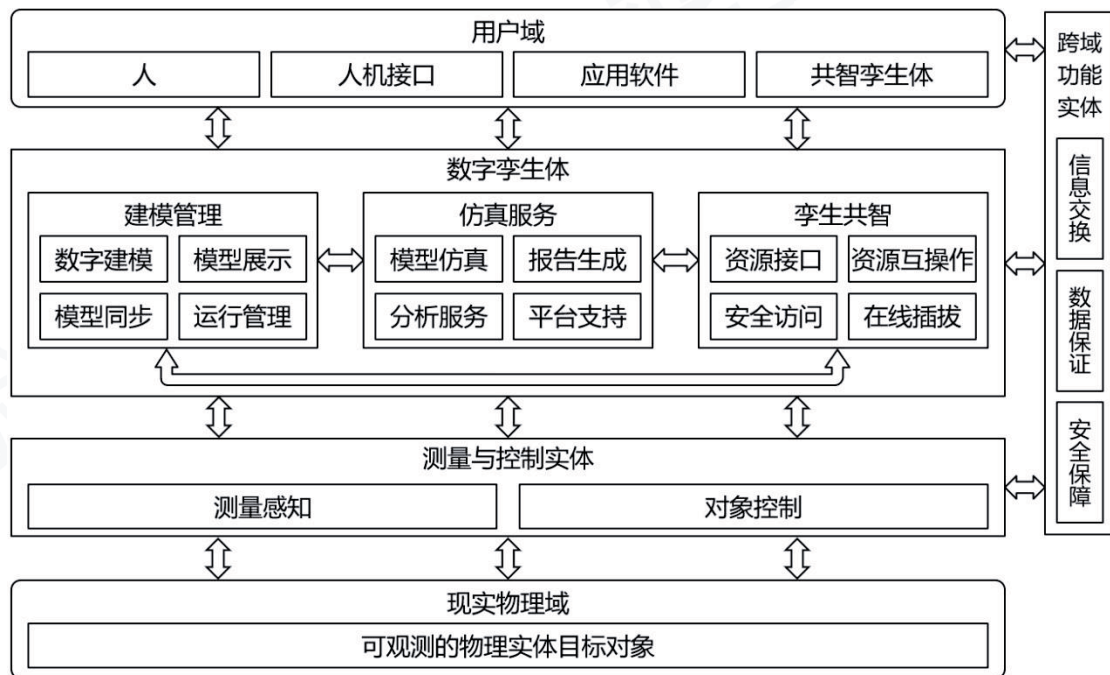


图 6 数字孪生系统的通用参考架构

(三) 数字孪生体的应用框架

基于数字孪生体概念模型(图 5)和数字孪生系统参考架构(图 6)，本白皮书将系统目的、系统层次/物质尺度和系统生存期三个维度构成的三维空间作为数字孪生体应用场景的参考框架(图 7)。例如，数字孪生体的创建、对象系统的故障诊断和健康管理都是在系统生存期维度上的扩展应用。表 3 给出了数字孪生体按系统目的和系统层次/物质尺度两个维度展开的应用场景示例。

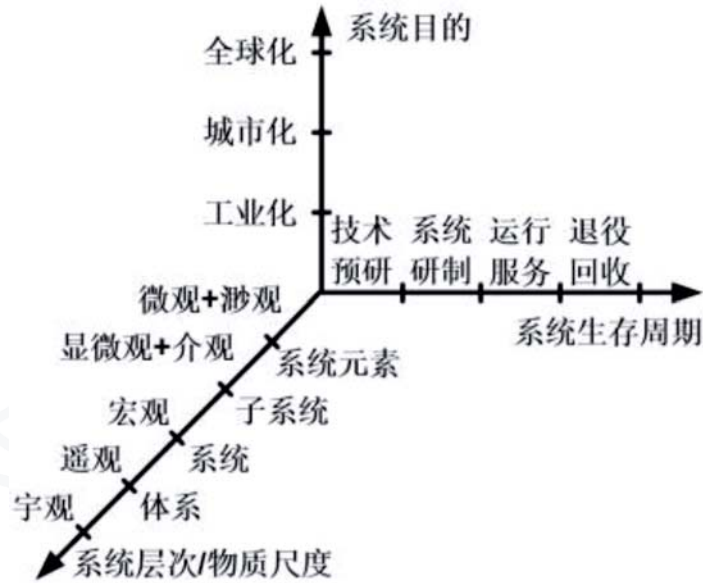


图 7 数字孪生体应用场景的参考框架

表 3 按系统目的和尺度层次维度展开的数字孪生体应用场景示例

物质层次/系统层次	工业化	城市化	全球化
微观+渺观			
显微观+介观/系统元素	集成计算材料工程， 微纳制造， 增材制造工艺仿真		
宏观/子系统	智能加工单元	智能家居	
宏观/系统	研发设计智能车间/工厂	智能建筑	单个产业的全球供应链网络
宏观/体系	分布式制造 服务型制造 数字农业	数字孪生城市，智慧交通，智慧医疗，智能电网，智慧能源	面向产业集群的全球供应链网络，数字孪生政府， 数字孪生战场
遥观/体系	太空制造	近地轨道基地	智慧地球
宇观/体系	月球/火星探测	月球/火星基地	地月一体化系统

表 3 中加粗标红的场景，本白皮书后续章节将按数字孪生制造、数字孪生产业、数字孪生城市、数字孪生战场分别展开阐述。物质层次的划分引用了北京大学化学与分子工程学院徐光宪院士的工作。

（四）数字孪生体成熟度模型

数字孪生体不仅仅是物理世界的镜像，也要接受物理世界实时信息，更要反过来实时驱动物理世界，而且进化为物理世界的先知、先觉甚至超体。这个演变过程称为成熟度进化，即一个数字孪生体的生长发育将经历数化、互动、先知、先觉和共智等几个过程（图 8）。

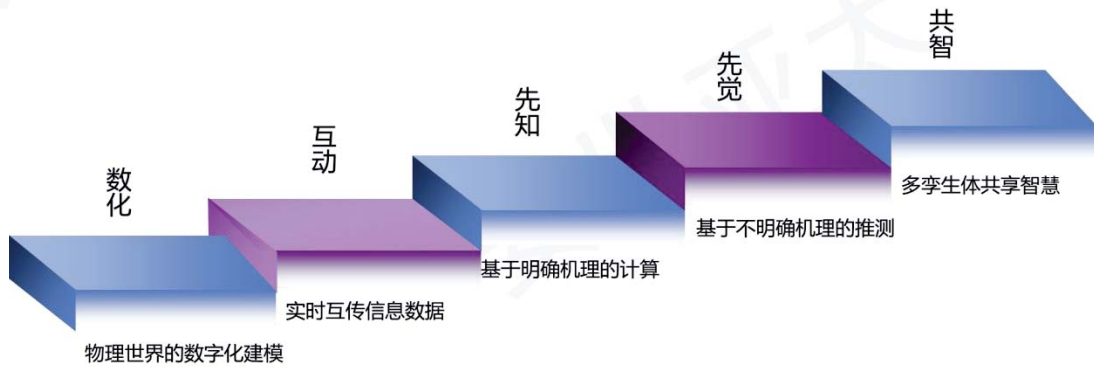


图 8 数字孪生体成熟度模型

1. 数化

“数化”是对物理世界数字化的过程。这个过程需要将物理对象表达为计算机和网络所能识别的数字模型。建模技术是数字化的核心技术之一，例如测绘扫描、几何建模、网格建模、系统建模、流程建模、组织建模等技术。物联网是“数化”的另一项核心技术，将物理世界本身的状态变为可以被计算机和网络所能感知、识别和分析。

2. 互动

“互动”主要是指数字对象间及其与物理对象之间的实时动态互动。物联网是实现虚实之间互动的核心技术。数字世界的责任之一是预测和优化，同时根据优化结果干预物理世界，所以需要将指令传递到物理世界。物理世界的新状态需要实时传导到数字世界，作为数字世界的新初始值和新边界条件。另外，这种互动包括数字对象之间的互动，依靠数字线程来实现。

3. 先知

“先知”是指利用仿真技术对物理世界的动态预测。这需要数字对象不仅表达物理世界的几何形状，更需要在数字模型中融入物理规律和机理。仿真技术不仅建立物理对象的数字化模型，还要根据当前状态，通过物理学规律和机理来计算、分析和预测物理对象的未来状态。这种仿真不是对一个阶段或一种现象的仿真，应是全周期和全领域的动态仿真。

4. 先觉

如果说“先知”是依据物理对象的确定规律和完整机理来预测数字孪生体的

未来,那“先觉”就是依据不完整的信息和不明确的机理通过工业大数据和机器学习技术来预感未来。如果要求数字孪生体越来越智能和智慧,就不应局限于人类对物理世界的确定性知识。其实人类本身就不是完全依赖确定性知识而领悟世界的。

5. 共智

“共智”是通过云计算技术实现不同数字孪生体之间的智慧交换和共享,其隐含的前提是单个数字孪生体内部各构件的智慧首先是共享的。所谓“单个”数字孪生体是人为定义的范围,多个数字孪生单体可以通过“共智”形成更大和更高层次的数字孪生体,这个数量和层次可以是无限的。众多数字孪生体在“共智”过程中必然存在大量的数字资产的交易,区块链则提供了最佳交易机制。

表 4 数字孪生体成熟度模型、关键特征和关键技术

级别	名称	关键特征	关键技术
1	数化	对物理世界进行数字化建模	建模/物联网
2	互动	数字间及其与物理之间实时互传信息和数据	物联网/数字线程
3	先知	基于完整信息和明确机理预测未来	仿真/科学计算
4	先觉	基于不完整信息和不明确机理推测未来	大数据/机器学习
5	共智	多个数字孪生体之间共享智慧,共同进化	云计算/区块链

四、数字孪生体的关键技术

从数字孪生体概念模型(图5)和数字孪生系统参考架构(图6)可以看出:建模、仿真和基于数据融合的数字线程是数字孪生体的三项核心技术;能够做到统领建模、仿真和数字线程的系统工程和MBSE,则成为数字孪生体的顶层框架技术;物联网是数字孪生体的底层伴生技术;而云计算、机器学习、大数据、区块链则是数字孪生体的外围使能技术。

(一) 建模

从图2可以看出,数字化建模技术起源于上世纪50年代。建模的目的是将我们对物理世界或问题的理解进行简化和模型化。而数字孪生体的目的或本质是通过数字化和模型化,用信息换能量,以更少的能量消除各种物理实体、特别是复杂系统的不确定性。所以建立物理实体的数字化模型或信息建模技术是创建数字孪生体、实现数字孪生的源头和核心技术,也是“数化”阶段的核心。

由于本白皮书将数字孪生体放在工业化、城市化和全球化所指向的人类文明可持续发展的大目标下,所以,数字孪生体所需的建模技术也需要放在数字孪生体应用场景的参考框架(图7)下考察。具体地说,数字孪生体的概念模型(图5)中数字模型的视角类型的三个维度:需求指标、生存期阶段和空间尺度构成了数字孪生体建模技术体系的三维空间(图9)。

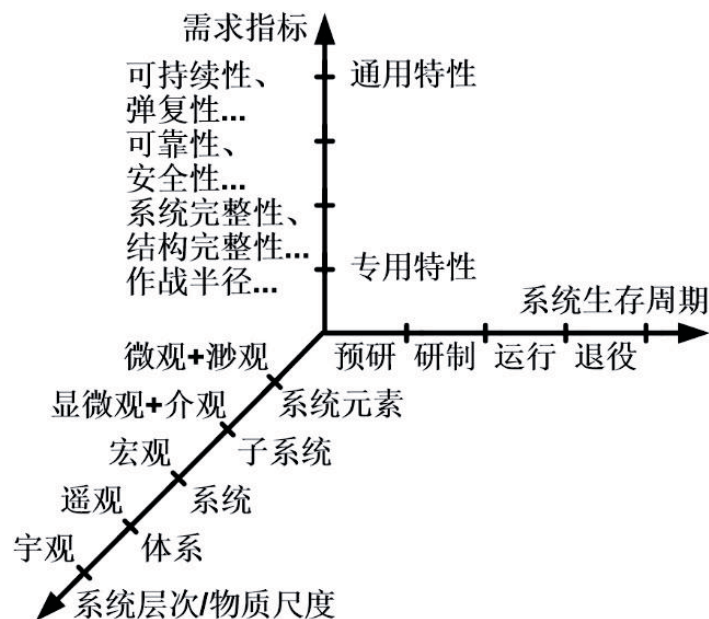


图9 数字孪生体建模技术扩展框架

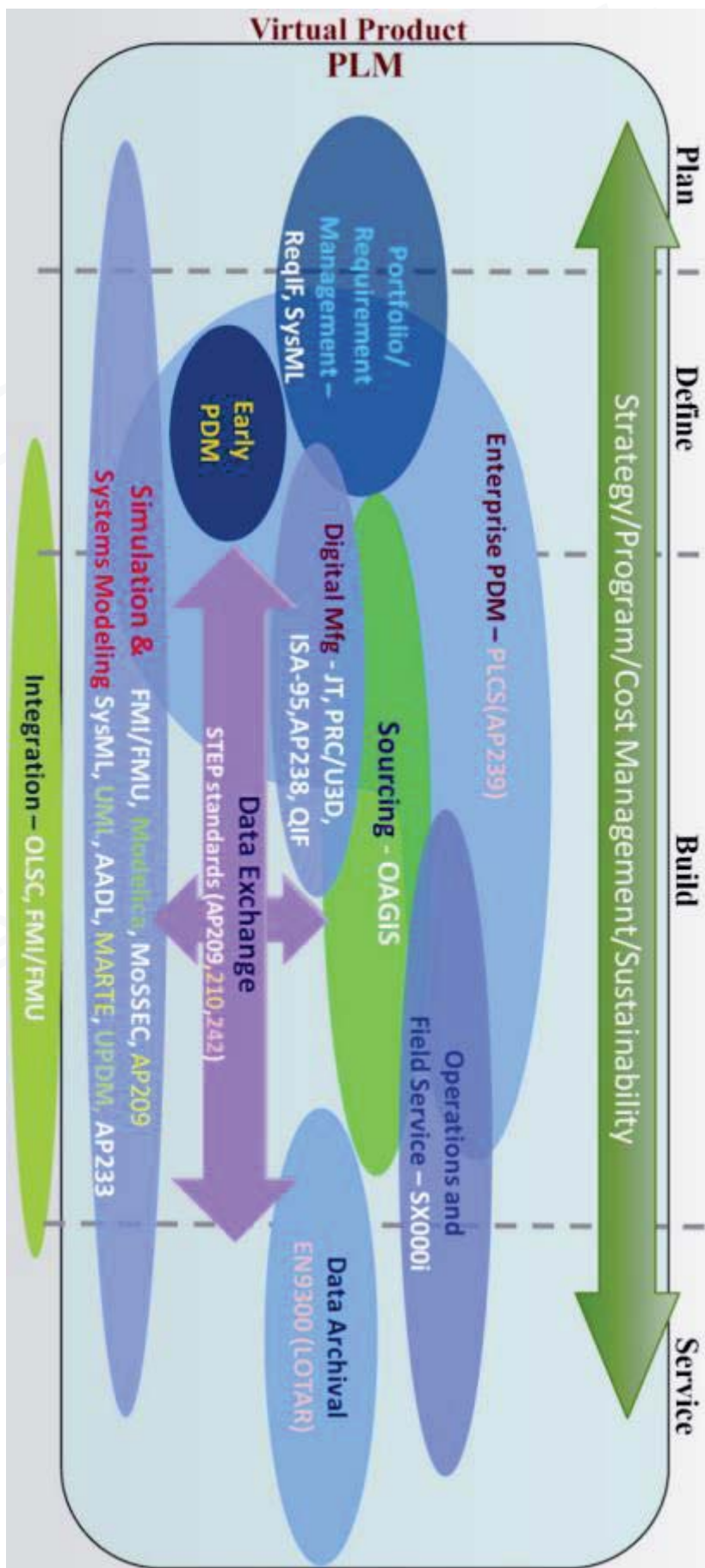
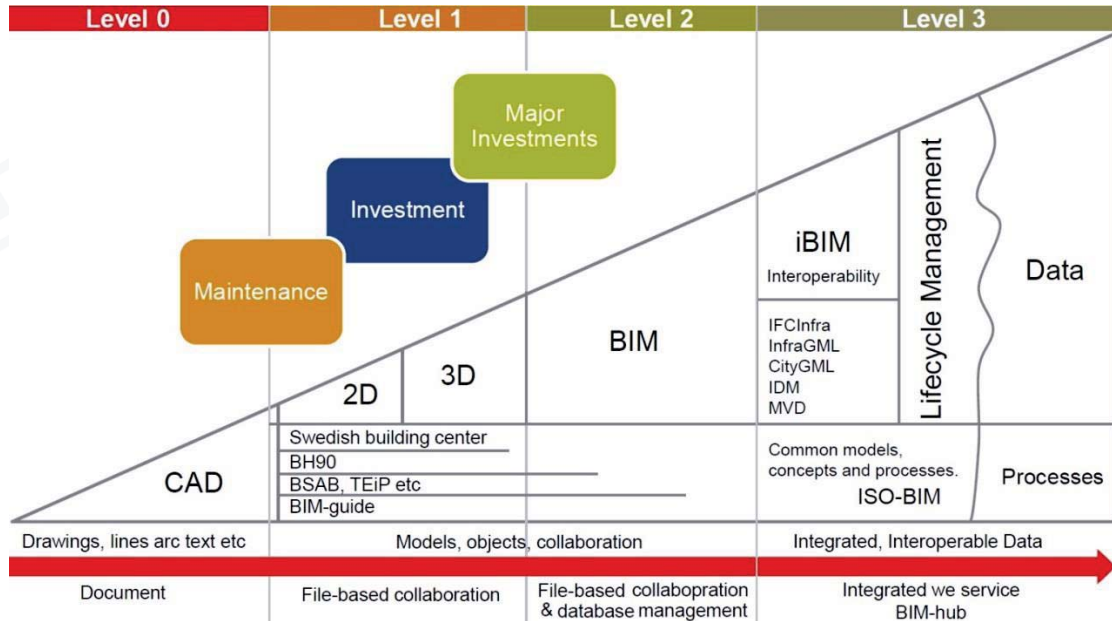
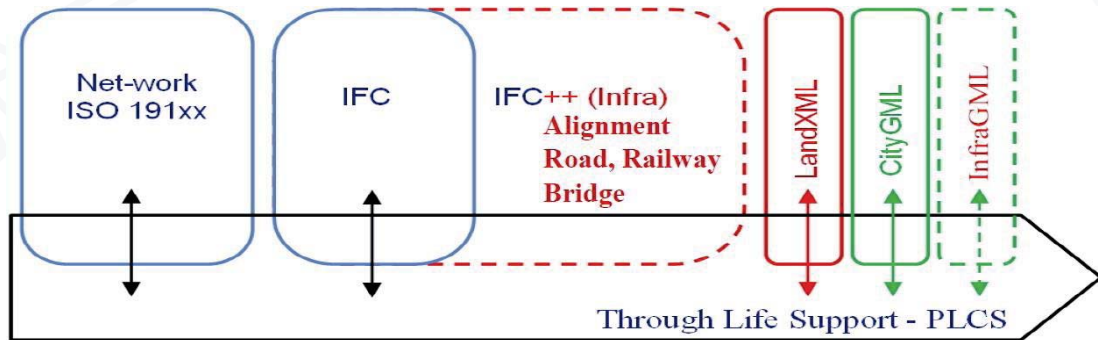


图 10 工业化视角下的 PLM 建模技术体系 (来源: CIMdata)

将这一框架在工业化、城市化、全球化下不同的应用场景下进行实例化，可得到具体场景的数字孪生体建模技术体系。图 10 是工业化视角下，在系统生存周期和系统层次两个维度展开得到的 PLM 建模技术体系。图 11 是城市化视角下的建模技术体系，其中图(a)是英国数字建筑战略给出的从基于文档到基于模型的建筑信息建模成熟度进化等级；图(b)展示了瑞典等北欧国家开展的基于 PLCS(ISO 10303-239) 标准实现地理、建筑、城市等信息建模技术之间协同的验证工作。



(a) 建筑信息建模技术的成熟度 (来源: 英国标准学会)



(b) 地理信息、建筑信息、城市信息建模技术的协同 (来源: KTH)

图 11 城市化视角下的建模技术体系

同理，传播设计（见图 3，是指利用感觉符号，如视听符号，进行信息传达的设计，可用于媒体、影视和娱乐等行业）所需的 VR/AR/MR 等可视化建模技术（详见本章第三节）、数字孪生组织所需的社会网络建模技术、以及数字孪生战场所需的指挥控制建模技术等，都属于全球化视角下人与人、人与组织、组织与组织之间沟通交流所需的建模技术。

在某个应用场景下的某种建模技术，只能提供某类物理实体某个视角的模型

视图。这时数字孪生体和对应物理实体间的互动（状态感知和对象控制的数据流和信息流传递），一般只能满足单个低层次具体需求指标的要求。对于复合的、高层次需求指标，通常需要有反映若干建模视角的多视图模型所对应的多个数字孪生体与同一个物理实体对象实现互动。这时的多视图或多视角一般来自物理实体对象的不同生存期阶段或多个系统层次/物质尺度，多视图模型间的协同就需要数字线程技术的支持。

（二）仿真

从技术角度看，建模和仿真是一对伴生体：如果说建模是模型化我们对物理世界或问题的理解，那么仿真就是验证和确认这种理解的正确性和有效性。所以，数字化模型的仿真技术是创建和运行数字孪生体、保证数字孪生体与对应物理实体实现有效闭环的核心技术。

仿真是将包含了确定性规律和完整机理的模型转化成软件的方式来模拟物理世界的一种技术。只要模型正确，并拥有了完整的输入信息和环境数据，就可以基本正确地反映物理世界的特性和参数。

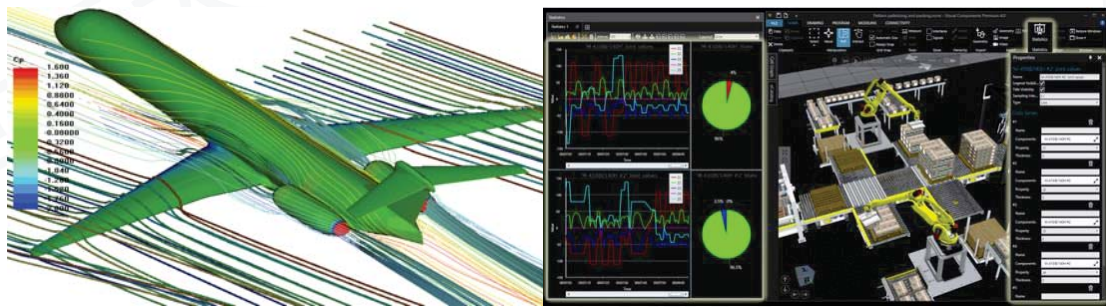
仿真兴起于工业领域。作为必不可少的重要技术，已经被世界上众多企业广泛应用到工业各个领域，是推动工业技术快速发展的核心技术，也是工业 3.0 时代最重要的技术之一，在产品优化和创新活动中扮演不可或缺的角色。近年来，在工业 4.0、智能制造等新一轮工业革命的兴起，新技术与传统制造的结合催生了大量新型应用，工程仿真软件也开始与这些先进技术结合，在研发设计、生产制造、试验运维各环节发挥更重要的作用。

随着仿真技术的发展，这种技术被越来越多的领域所采纳，逐渐发展出更多类型的仿真技术和软件。按照这样的发展下去，物理世界（含人类社会）可以像电影《黑客帝国》那样，被事无巨细地仿真和模拟。

针对数字孪生体紧密相关的四个关键场景——制造、产业、城市和战场，我们梳理其中所涉及到的仿真技术如下：

- ✓ 在制造场景下，可能涉及到的仿真包括产品仿真、制造仿真和生产仿真等大类（图 12）。其中的小类包括：
 - 产品仿真：系统仿真、多体仿真、物理场仿真、虚拟试验等；
 - 制造仿真：工艺仿真、装配仿真、数控加工仿真等；

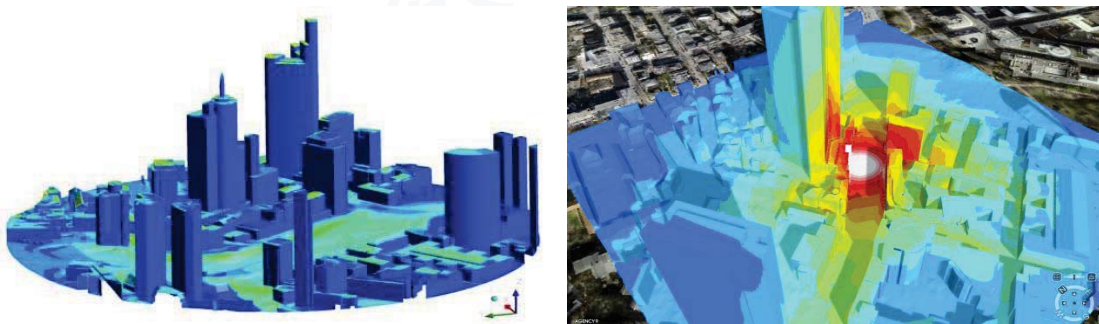
- 生产仿真：离散制造工厂仿真、流程制造仿真等。
 - ✓ 在产业场景下，可能涉及到的仿真包括仓储仿真、物流仿真、组织仿真、业务流程仿真等；
 - ✓ 在城市场景下，可能涉及到的仿真包括城市仿真、交通仿真、人群仿真、爆破仿真、气体扩散仿真等（图 13）；
 - ✓ 在军事场景下，可能涉及到的仿真包括体系仿真、战场仿真、爆轰仿真、毁伤仿真等。



飞机气动仿真

工厂仿真

图 12 制造场景下的仿真示例



城市风道仿真

城市爆破仿真

图 13 在城市场景下的仿真示例

数字孪生体是仿真应用新巅峰。在数字孪生体的成熟度的每个阶段，仿真都在扮演者不可或缺的角色：“数化”的核心技术——建模总是和仿真联系在一起，或是仿真的一部分；“互动”是半实物仿真中司空见惯的场景；“先知”的核心技术本身就是仿真；很多学者将“先觉”中的核心技术——工业大数据视为一种新的仿真范式；“共智”需要通过不同孪生体之间的多种学科耦合仿真才能让思想碰撞，才能产生智慧的火花。

数字孪生体也因为仿真在不同成熟度阶段以及在四大关键场景中无处不在而成为智能化和智慧化的源泉与核心。

(三) VR、AR 及 MR

虚拟现实(VR)、增强现实(AR)及混合现实(MR)等技术在近几年发展迅速,而且在以上各个场景中都有重要应用价值。

1. 虚拟现实

虚拟现实(Virtual Reality, 简称VR)利用现实生活中的数据,通过计算机技术产生的电子信号,将其与各种输出设备结合使其转化为能够让人们感受到的现象,这些现象可以是现实中真真切切的物体,也可以是我们肉眼所看不到的物质,通过三维模型表现出来。因为这些现象不是我们直接所能看到的,而是通过计算机技术模拟出来的现实中的世界,故称为虚拟现实。

虚拟现实技术是20世纪末逐渐兴起的一项综合性信息技术,融合了数字图像处理、计算机图形学、人工智能、多媒体、传感器、网络以及并行处理等多个信息技术分支的最新发展成果。虚拟现实技术的演变发展历程大体上可以分为四个阶段:1963年以前,蕴含虚拟现实技术的第一阶段;1963年-1972年,虚拟现实技术的萌芽阶段;1973年-1989年,虚拟现实技术概念和理论产生的初步阶段;1990年-2004年,虚拟现实技术理论的完善和应用阶段。2013年至今,互联网普及、计算能力、3D建模等技术进步大幅提升VR体验,虚拟现实商业化、平民化有望得以实现。相比于80~90年代,显示器分辨率提升、显卡渲染效果和3D实时建模能力等原有技术的快速提升带来了VR设备的轻量化、便捷化和精细化,从而大幅提升了VR设备的体验。

虚拟现实利用计算机生成逼真的三维视、听、嗅觉等感觉,使人作为参与者通过适当装置,自然地对虚拟世界进行体验和交互作用。使用者进行位置移动时,计算机可以立即进行复杂运算,将精确的3D世界影像传回,从而产生临场感。

虚拟现实技术的研究内容大体上可分为VR技术本身的研究和VR技术应用的研究两大类。根据VR所倾向的特征的不同,目前虚拟现实系统主要划分为四个层次:即桌面式、增强式、沉浸式和网络分布式虚拟现实。VR技术的实质是构建一种人能够与之进行自由交互的“世界”,在这个“世界”中参与者可以实时地探索或移动其中的对象。

虚拟现实的用户可以在虚拟现实世界体验到最真实的感受,其模拟环境的真实性与现实世界难辨真假,让人有种身临其境的感觉。同时,虚拟现实具有一切

人类所拥有的感知功能，比如听觉、视觉、触觉、味觉、嗅觉等感知系统。最后，它具有超强的仿真系统，真正实现了人机交互，使人在操作过程中，可以随意操作并且得到环境最真实的反馈。正是虚拟现实技术的存在性、多感知性、交互性等特征使它受到了许多人的喜爱。

2. 增强现实

增强现实 (Augmented Reality, 简称 AR)，也被称为扩增现实，是虚拟现实技术的发展。它能促使真实世界信息和虚拟世界信息内容之间综合在一起。其将原本在现实世界的空间范围中比较难以进行体验的实体信息在电脑等科学技术的基础上，实施模拟仿真处理，将虚拟信息内容叠加在真实世界中，并且能够被人类感官所感知，从而实现超越现实的感官体验。真实环境和虚拟物体之间叠加之后，能够在同一个画面以及空间中同时存在。用户需要利用头盔显示器或眼镜，使真实世界和电脑图形重合在一起，在重合之后可以充分看到真实的世界围绕着它。

3. 混合现实

混合现实技术 (Mixed Reality, 简称 MR) 也是虚拟现实技术的发展，该技术通过在虚拟环境中引入现实场景信息，在虚拟世界、现实世界和用户之间搭起一个交互反馈的信息回路，以增强用户体验的真实感。混合现实是一组技术组合，不仅提供新的观看方法，还提供新的输入方法，而且所有方法相互结合，从而推动创新。

无论是虚拟现实、增强现实还是混合现实，在数字孪生体的各个场景中都有巨大的应用潜力。人类通过屏幕与数字世界交互既不直观、不真实，而且交互深度受到巨大限制。这三种技术提供的深度沉浸的交互方式让人类与数字世界的交互方式与物理世界交互方式类似，使数字化的世界在感官和操作体验上更加接近物理世界，让“孪生”一词变得更为精妙。但在数字世界中，人类又具有超人般的特异功能，可以无限驾驭数字世界，例如穿墙而过、隔空取物、时空穿越、变换大小等，将数字孪生体的应用推向极致。

(四) 数字线程

数字线程是指可扩展、可配置和组件化的企业级分析通信框架。基于该框架可以构建覆盖系统生命周期与价值链全部环节的跨层次、跨尺度、多视图模型的

集成视图，进而以统一模型驱动系统生存期活动，为决策者提供支持（图 14）。

根据美军方对数字线程的定义和解释，其目标就是要在系统全生命期内实现在正确的时间、正确的地点，把正确的信息传递给正确的人。这一目标和上世纪九十年代 PDM/PLM 技术和理念出现时的目标完全一致，只不过数字线程是要在数字孪生环境下实现这一目标。

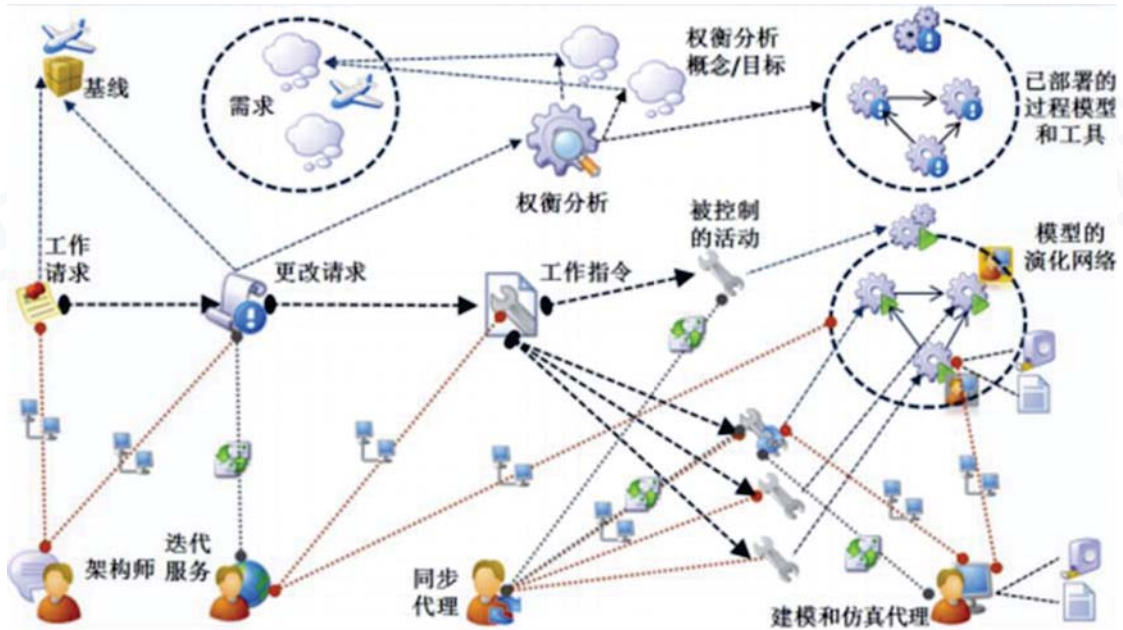


图 14 数字线程示例

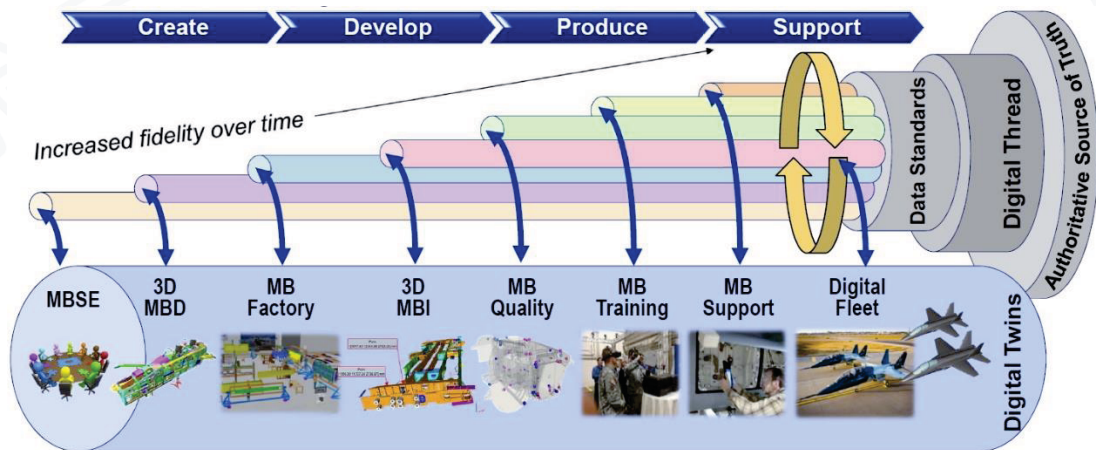


图 15 数字孪生体与数字线程的关系（来源：波音）

数字线程是与某个或某类物理实体对应的若干数字孪生体之间的沟通桥梁，这些数字孪生体反映了该物理实体不同侧面的模型视图。数字线程和数字孪生体之间的关系（图 15）。

从图 15 可以看出，能够实现多视图模型数据融合的机制或引擎是数字线程技术的核心。因此，数字孪生体的概念模型（图 5）中，将数字线程表示为模型

数据融合引擎和一系列数字孪生体的集合。数字孪生环境下(即图 5 数字孪生域内),实现数字线程有如下需求:

- ✓ 能区分类型和实例;
- ✓ 支持需求及其分配、追踪、验证和确认;
- ✓ 支持系统跨时间尺度各模型视图间的实际状态记实、关联和追踪;
- ✓ 支持系统跨空间尺度各模型视图间的关联和及其与时间尺度模型视图的关联;
- ✓ 记录各种属性及其值随时间和不同的视图的变化;
- ✓ 记录作用于系统以及由系统完成的过程或动作;
- ✓ 记录使能系统的用途和属性;
- ✓ 记录与系统及其使能系统相关的文档和信息。

空客、波音等航空航天企业在各自的验证项目中验证了 PLCS 标准满足上述需求,在 PLM 领域内(图 10)对实现数字线程的支持。瑞典皇家理工学院验证了 PLCS 标准满足上述需求,在建筑模型、城市模型、地理信息模型间(图 11b)的协同和互操作场景下对实现数字线程的支持。

(五) 系统工程与 MBSE

系统工程是应用系统的思维、原理和方法,解决复杂问题,保证把复杂的事情做对、做好、做快的一套方法论。系统工程的基础和核心是系统思维,即凡事皆系统。系统有层次性、涌现性和目的性,运用功能的观点和进化的观点从静态和动态两个方面全面认识系统。基于模型的系统工程(MBSE)是一种形式化的建模方法学,是为了应对基于文档的传统系统工作模式在复杂产品和系统研发时所面临的挑战,以逻辑连贯一致的多视角通用系统模型为桥梁和框架,实现跨领域模型的可追踪、可验证和全生命期内的动态关联,进而驱动贯穿于从概念方案、工程研制、使用维护到报废更新的人工系统全生命期内的系统工程过程和活动。这些过程与活动包括技术过程、技术管理过程、协议过程和组织项目使能过程等,广泛存在于体系、系统及系统组件各个层级之内。除方法学本身外,广义 MBSE 还包括方法学所需的使能技术(如建模语言)和人员能力,以及方法学的应用环境等所构成的体系。

系统工程和 MBSE 对数字孪生体的作用和价值如下:

- ✓ 系统工程 (Systems Engineering) 和体系工程 (Systems of Systems Engineering) 的建模和仿真方法和流程可以作为顶层框架分别指导系统级数字孪生体和体系级数字孪生体 (如共智孪生体) 的构建和运行。
- ✓ MBSE 是创建数字孪生体的框架, 数字孪生体可以通过数字线程集成到 MBSE 工具套件中, 进而成为 MBSE 框架下的核心元素 (图 16)。
- ✓ 从系统生存周期的角度, MBSE 可以作为数字线程的起点, 使用从物联网收集的数据, 运行系统仿真来探索故障模式, 从而随着时间的推移逐步改进系统设计。

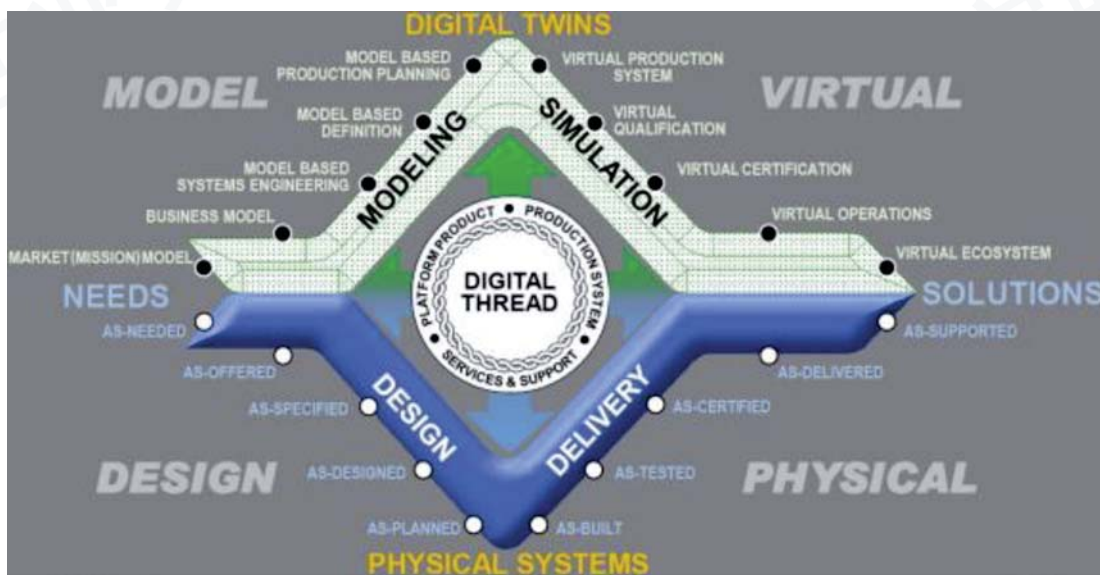


图 16 MBSE 是实现数字孪生体和数字线程的顶层框架 (来源: 波音)

(六) 物联网

物联网指的是将无处不在的末端设备和设施, 包括具备“内在智能”的传感器、移动终端、工业系统、数控系统、家庭智能设施、视频监控系统等、和外在使能的, 如贴上 RFID 的各种资产、携带无线终端的个人与车辆等等“智能化物件或动物”或“智能尘埃”, 通过各种无线和/或有线的长距离和/或短距离通讯网络实现互联互通、应用大集成、以及基于云计算的 SaaS 营运等模式, 在内网、专网、和/或互联网环境下, 采用适当的信息安全保障机制, 提供安全可控乃至个性化的实时在线监测、定位追溯、报警联动、调度指挥、预案管理、远程控制、安全防范、远程维保、在线升级、统计报表、决策支持、领导桌面等管理和服务功能, 实现对“万物”的“高效、节能、安全、环保”的“管、控、营”一体化。

物联网是指通过各种信息传感器、射频识别技术、全球定位系统、红外感应

器、激光扫描器等各种装置与技术,实时采集任何需要监控、连接、互动的物体或过程,采集其声、光、热、电、力学、化学、生物、位置等各种需要的信息,通过各类可能的网络接入,实现物与物、物与人的泛在连接,实现对物品和过程的智能化感知、识别和管理。物联网是一个基于互联网、传统电信网等的信息承载体,它让所有能够被独立寻址的普通物理对象形成互联互通的网络。

根据 ISO/IEC 30141:2018 和 GB/T 33474-2016,物联网的参考架构(图 17)。物联网是数字孪生体的载体,数字孪生体是物联网的底层逻辑。数字孪生体和物联网是相互成就的关系。一方面,物联网为数字孪生体的数据流和信息流提供参考架构。同时,数字孪生体是物联网发展应用的新阶段。数字孪生体之所以变得越来越受欢迎,是因为它能够显著降低物联网生态系统复杂性并提高效率。

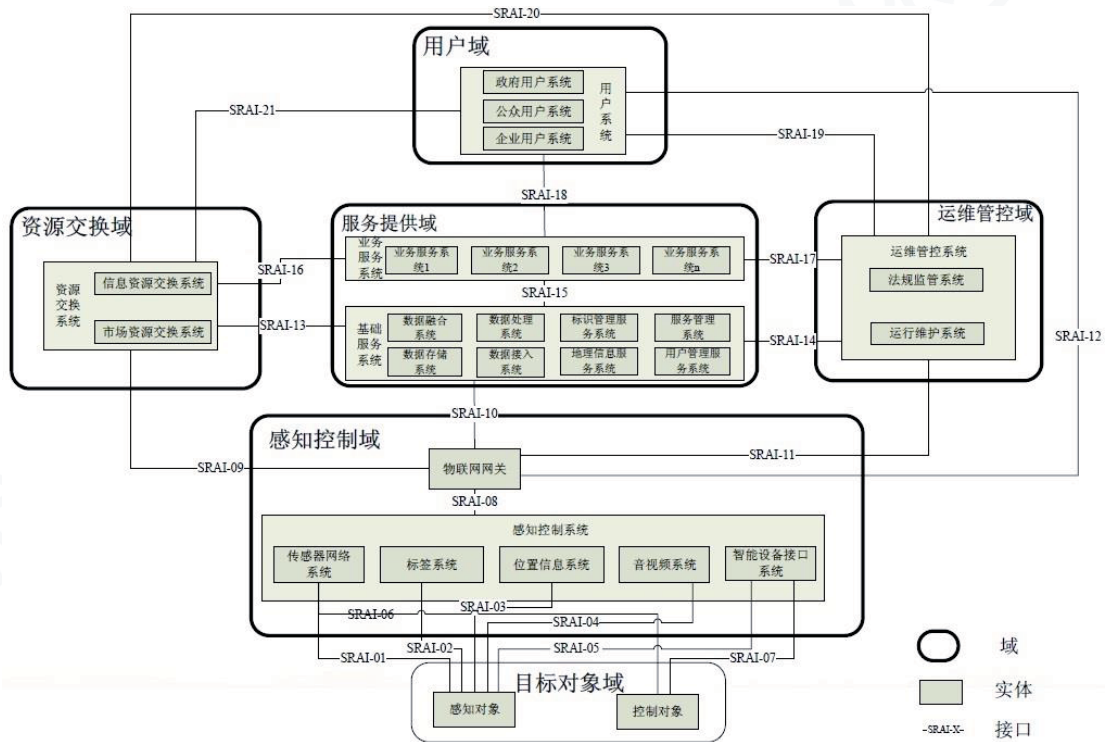


图 17 物联网参考架构 (来源: GB/T 33474-2016)

(七) 云、雾与边缘计算

云计算是分布式计算的一种,指的是通过网络“云”将巨大的数据计算处理程序分解成无数小程序,通过多部服务器组成的系统进行处理和分析这些小程序得到结果并返回给用户。云计算是分布式计算、效用计算、负载均衡、并行计算、网络存储、热备份冗余和虚拟化等计算机技术混合演进并跃升的结果。

云计算系统由云平台、云存储、云终端、云安全四个基本部分组成。云平台从用户的角度可分为公有云、私有云、混合云等。通过从提供服务的层次可分为:

基础设施即服务 (IaaS)、平台即服务 (PaaS) 和软件即服务 (SaaS)。

近几年来,云计算正在成为信息技术产业发展的战略重点,全球的信息技术企业都在纷纷向云计算转型。

雾计算的概念最初是由美国纽约哥伦比亚大学的 Salvatore Stolfo 教授提出的,当时的意图是利用“雾”来阻挡黑客入侵。雾计算可理解为本地化的云计算。

边缘计算是指利用靠近数据源的边缘地带来完成的运算程序。这种运算既可以在大型运算设备内完成,也可以在中小型运算设备、本地端网络内完成。用于边缘运算的设备可以是智能手机这样的移动设备、PC、智能家居等家用终端,也可以是 ATM 机、摄像头等终端。如果说云计算是集中式大数据处理,那么边缘计算可以理解为边缘式大数据处理。

云计算、雾计算和边缘计算可以为数字孪生体提供计算基础设施。

“共智”的目标是实现不同数字孪生体智慧的交换和共享,其隐含的前提是单个数字孪生体内部各构件的智慧首先是共享的。云计算、雾计算和边缘计算则为数字孪生体内部和之间进行智慧共享提供了可能。

构建单元级数字孪生体时需要满足的基本要求包括:1) 状态感知;2) 计算和处理数据;3) 物理实体控制。作为一种将计算、网络和存储功能从云扩展到边缘的体系结构,边缘计算可通过边缘节点中的数据分析和处理实现对对象的感知、计算和控制。

系统级数字孪生体强调其组成元素之间的互连性和互操作性,以及不同元素的实时和动态协作控制,以实现物理世界和数字世界的协调与统一。通常,系统级数字孪生体在地理位置上很集中(主要在制造企业内部),非常适合雾计算模型。其数据可以直接通过雾计算进行处理以提高效率,而不必扩散到云中再从云中传回。考虑到延迟、网络流量、成本等因素,雾计算在网络边缘提供服务,从而促进了实时交互、可伸缩性和互操作性。

体系级数字孪生体需要满足的要求包括:1) 分布式数据存储和处理;2) 为企业协作提供数据和智能服务。云计算是体系级数字孪生体分析的理想技术。云计算体系结构有利于大量连接设备的组织和管理,以及企业内部和外部数据的组合和集成。在云计算体系结构中,各种不同类型的存储设备可以通过应用软件一起工作,共同为企业提供数据存储和业务访问。

（八）大数据与机器学习

Gartner 公司对大数据的定义如下：大数据是大量、高速、及/或多变的信息资产，它需要新型的处理方式去促成更强的决策能力、洞察力与最优化处理。大数据的主要特征包括：1) 数据体量巨大（大量）；2) 数据类型繁多（多样）；3) 价值密度低，商业价值高；4) 处理速度快；5) 数据实时在线。

机器学习是一门多领域交叉学科，涉及概率论、统计学、逼近论、凸分析、计算复杂性理论等多门学科。机器学习理论主要是设计和分析让计算机可以自动“学习”的算法。机器学习可以分成下面四种类别：1) 监督学习；2) 非监督学习；3) 半监督学习；4) 增强学习机器。

机器学习算法是一类从数据中自动分析获得规律，并利用规律对未知数据进行预测的算法。因此，机器学习总是和大数据相伴而生。

在数字孪生体中，物联网的一项重要作用就是收集来自物理世界的的数据，这种数据往往具备大数据特征。数字孪生体使用这些数据的一种模式就是通过机器学习技术，在物理机理不明确、输入数据不完备的情况下对数字孪生体的未来状态和行为进行预测，尽管这种预测未必准确，特别在数字孪生体的发育期，机器学习时间尚不充足。但相比一无所知，这种预测仍富有价值。而且随着数字孪生体的进化，这种预测会越来越逼近真实世界，使得数字孪生体拥有“先觉”能力。

（九）区块链

区块链是一系列现有成熟技术的有机组合，它对账本进行分布式的有效记录，并且提供完善的脚本以支持不同的业务逻辑。在典型的区块链系统中，数据以区块为单位产生和存储，并按照时间顺序连成链式数据结构。所有节点共同参与区块链系统的数据验证、存储和维护。新区块的创建通常需得到全网多数（数量取决于不同的共识机制）节点的确认，并向各节点广播实现全网同步，之后不能更改或删除。区块链的核心技术包括：

1) 分布式账本

分布式账本技术本质上是一种可以在多个网络节点、多个物理地址或者多个组织构成的网络中进行数据分享、同步和复制的去中心化数据存储技术。

2) 共识机制

区块链是一个历史可追溯、不可篡改、解决多方互信问题的分布式（去中心化）系统。分布式系统必然面临着一致性问题，而解决一致性问题的过程称为“共

识”。分布式系统的共识达成需要依赖可靠的共识算法。共识算法通常解决的是分布式系统中由哪个节点发起提案,以及其他节点如何就这个提案达成一致的问题。根据传统分布式系统与区块链系统间的区别,共识算法分为可信节点间的共识算法与不可信节点间的共识算法。

3) 智能合约

智能合约是一种旨在以信息化方式传播、验证或执行合同的计算机协议。智能合约允许在没有第三方的情况下进行可信交易。这些交易可追踪且不可逆转。其目的是提供优于传统合同方法的安全,并减少与合同相关的其他交易成本。

4) 密码学

信息安全及密码学技术是整个信息技术的基石。在区块链中也大量使用了现代信息安全和密码学的技术成果,主要包括哈希算法、对称加密、非对称加密、数字签名、数字证书、同态加密、零知识证明等。

创建数字线程是为了替代二维设计和制造信息,该信息传统上指导了产品的制造生命周期。但是,这需要人工在每个步骤上解释、翻译、重新输入和传输数据。使用数字线程方法的过程取而代之的是一组可以从头到尾进行电子交换和处理的三维数字化指令,从而节省了时间和金钱,降低了人为错误的风险。因为过程中的步骤是按时间顺序排列的,就像金融交易一样,所以区块链非常适合为数字线程网络提供与加密货币相同的保护。

数字孪生体是典型的数字资产。在众多数字孪生体“共智”的过程中,必然存在数字资产的交易。区块链提供的去中心化的交易机制能很好地支持分布、实时和精细化的数字资产交易,可以成为数字孪生体最佳的资产交易媒介。同时它也能引入信任度,持续保持透明度,很好地支持数字资产交易生态系统的参与主体,包括数字资产的采集、存储、交易、分发和服务各个流程的参与者(图 18)。最后,去中心化数据交易网络也需要在可扩展性,交易成本和交易速度方面有突破,才能加速推动数字资产的商用化。

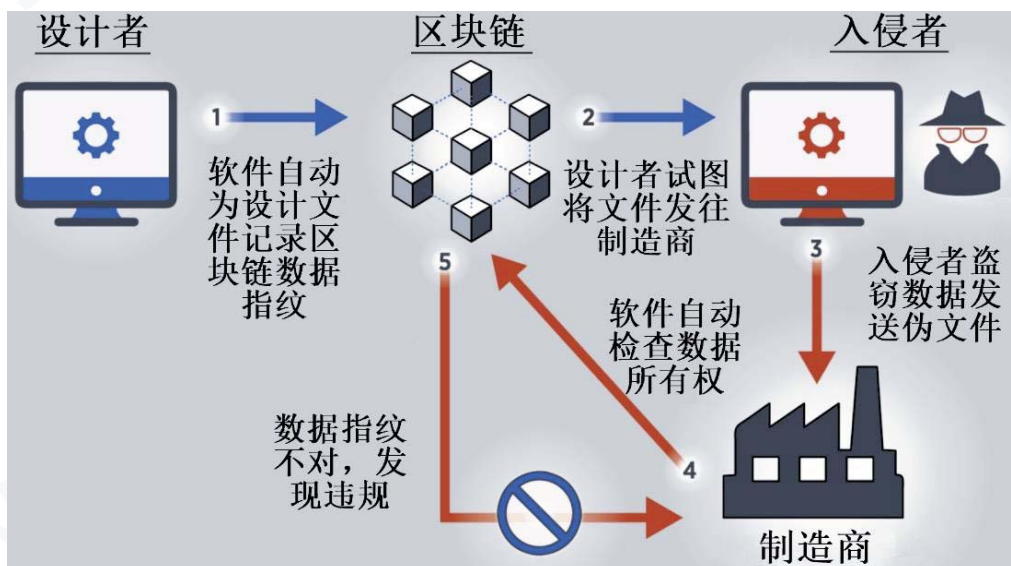


图 18 区块链在智能制造场景中的应用示例 (来源: NIST)

五、数字孪生制造

(一) 现状

近年来,制造业在逐步走向智能化。数字孪生体作为制造业智能化的核心技术之一,受到了越来越多的关注和研究。根据前文所述的数字孪生体发展阶段,数字孪生体已经经历了技术准备期、概念制造期和预先应用期,在制造业的多个领域取得了一定的技术积累和预先应用。

自从有了诸如 CAD 等数字化手段后,数字孪生体技术已经开始萌芽。有了 CAE 仿真手段,研究手段从计算机简单辅助向自动化转变,数字虚体和物理实体走得更近。有了系统仿真,研究对象从简单物体向复杂系统转变,虚拟实体更像物理实体。直到有了比较系统的数字样机技术,研究目标从单体动力学向多体动力学转变,研究形式从静态向动态转变。随着数字孪生体技术的不断发展,数字孪生体逐步迈向大规模扩展应用期。

目前数字孪生体正在与人工智能技术深度结合,促进信息空间与物理空间的实时交互与融合,通过在信息化平台内进行更加真实的数字化模拟,实现更广泛的应用。将数字孪生体与机器学习框架相结合,数字孪生体可以根据多重的反馈源数据进行自我学习,从而实时地在数字世界里呈现物理体的真实状况,并能够对即将发生的事件进行推测和预演。数字孪生体的自我学习除了可以依赖于传感器的反馈信息,也可通过历史数据,或者云平台的数据学习。

(二) 综述

实现数字孪生体是一系列使能技术的综合应用。在产品生命周期的不同阶段,有不同的主流技术应用于数字孪生体。本章首先给出数字孪生制造的参考架构,描述通用使能技术在数字孪生制造体系中的地位 and 作用,介绍数字孪生体在制造领域特有的关键技术,最后阐述数字孪生体在制造业的典型应用场景和案例。

在制造领域,一些传统的技术,如 CAD 和 CAE,天然就是为物理产品数字化而生。一些新兴技术,如 AI、AR、IoT,也为更逼真、更智能、更交互的数字孪生体插上了翅膀。可以预见,数字孪生体在研发设计和生产制造环节将会起到越来越大的作用,成为智能制造的基石。

在产品的设计阶段,使用数字孪生体可提高设计的准确性,并验证产品在真实环境中的性能,主要功能包括数字模型设计、模拟和仿真。对产品的结构、外

形、功能和性能（强度、刚度、模态、流场、热、电磁场等）进行仿真，用于优化设计、改进性能的同时，也降低成本。在个性化定制需求盛行的今天，设计需求及其变更信息的实时获取成为企业的一项重要竞争力，可以实时反馈产品当前运行数据的数字孪生体成为解决这一问题的关键。曾经在试验科学中广为应用的半实物仿真也将在数字孪生体中发挥重要作用。

在产品的制造阶段，使用数字孪生体可以缩短产品导入时间，提高设计质量，降低生产成本和加快上市速度。制造阶段的数字孪生体是一个高度协同的过程，通过数字化手段构建起来的数字生产线，将产品本身的数字孪生体同生产设备、生产过程等其他形态的数字孪生体形成共智关系，实现生产过程的仿真、参数优化、关键指标的监控和过程能力的评估。同时，数字生产线与物理生产线实时交互，物理环境的当前状态作为每次仿真的初始条件和计算环境，数字生产线的参数优化之后，实时反馈到物理生产线进行调控。在敏捷制造和柔性制造大为盛行的今天，对多个生产线之间的协调生产提出更高要求，多个生产线的数字孪生体之间的“共智”将是满足这一需求的有效方案。

（三）数字孪生制造参考架构

1. 参考架构

第三章给出了数字孪生系统的通用参考架构。参考这一通用架构，本章给出适用于数字孪生制造系统的参考架构（图 19）。

用户域和跨域功能实体的内容与前文的通用架构相同，这里不再赘述。

现实物理域：无论是离散型制造业还是流程型制造业，都包含研发设计阶段、生产运营阶段、维护服务阶段的各种物理实体，如人员、设备、试验、产品、材料、流程、环境、服务等。

测量与控制实体：这一层承担着物理实体和数字孪生体之间的互动功能。这层包含测量感知和对象控制两种功能，其中测量感知是数字孪生体从物理实体采集设备的设计、运行等各种参数，进行数据预处理和数据标识。对象控制则负责把数字孪生体发出的控制策略传递给物理实体。

数字孪生体：除了前文通用架构里阐述的三个部分外，这一层还包含制造物理域数字孪生组件（图中虚线框中）。针对现实物理域的每一个对象，都有一个对应的数字孪生体存在。

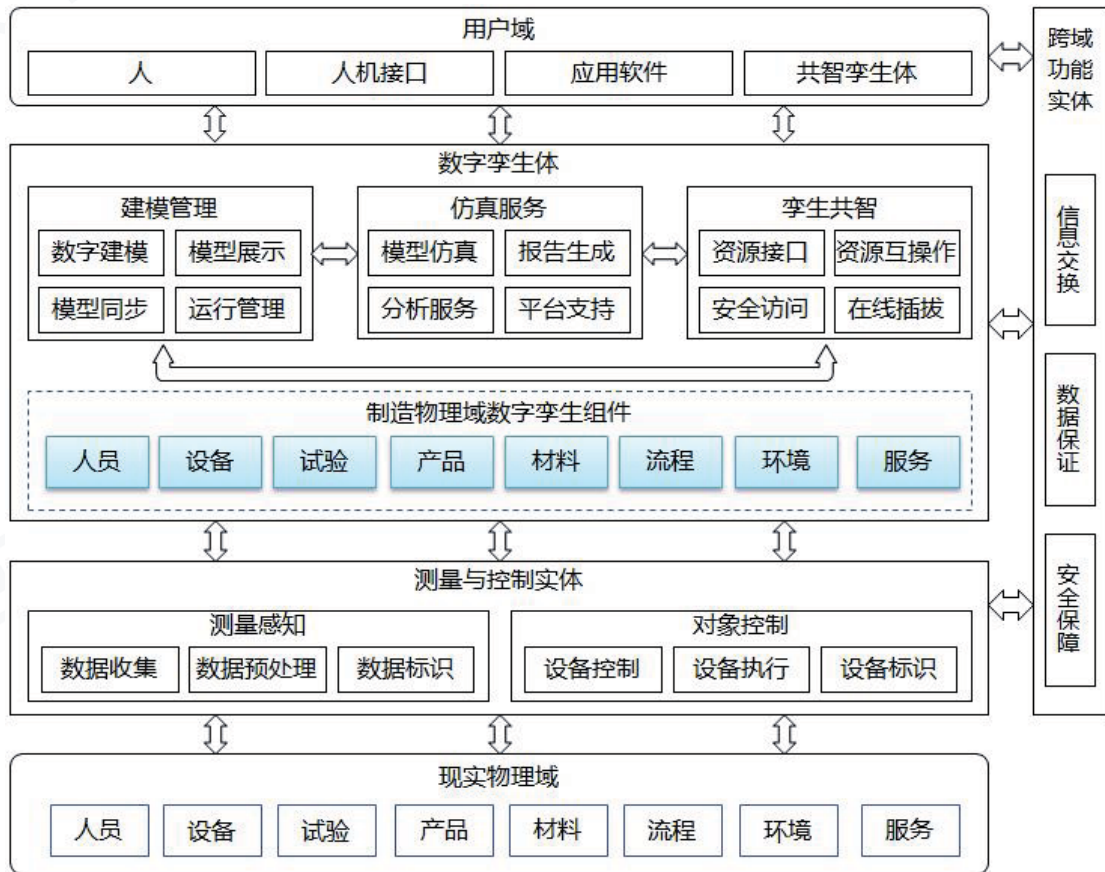


图 19 数字孪生制造系统的参考架构

2. 数字孪生制造的成熟度特征

按照前文数字孪生体成熟度模型，制造领域的数字孪生体在各成熟等级上的标志和特征如下：

1) 数化

- 针对产品及零部件建立了数字化模型，包含了零部件的结构、材料、状态等属性；
- 针对设备系统建立了数字化模型，包含了设备组成、装配关系、运行逻辑等特征；
- 针对生产线或流程建立了数字化模型，包含了生产线布局、流程布局、各个设备的干涉关系等；
- 针对工厂及环境建立了数字化模型，包含了厂房及厂房内设备、厂房外部气象环境、地理环境等因素；
- 针对人员建立了数字化模型，包含了操作人员作业管理、运行人员流程管理、质检人员标准校验管理等。

2) 互动

- 制造实体(包含产品、设备、生产线、流程、工厂等,下同)装备有充足的传感器和测量控制设备;
- 制造实体的状态能通过传感器和测控设备传输到数字孪生体;
- 数字孪生体能接收到制造实体传输的信号并和相应部分完成对接;
- 数字孪生体能传输控制策略和具体指令到制造实体;
- 制造实体能接收到数字孪生体的控制信号,并完成相应动作执行。

3) 先知

- 产品及零部件的数字孪生体能够仿真产品的力学、热学、电磁学、声学、光学等性能;
- 设备系统的数字孪生体能够仿真设备的动力学、运行、运动、操作过程、加工制造工艺等;
- 生产线或流程的数字孪生体能够仿真生产线内的物料搬运、工装干涉检测,以及流程的电气系统、控制系统、液压系统等;
- 工厂及环境的数字孪生体能够仿真厂房布局、物流过程、供需流程、效能效率、环境变化等;
- 人员的数字孪生体能够仿真人员的作业过程、运动、人机交互的动态过程等。

4) 先觉

- 数字孪生体能从历史数据中,分析出产品质量指标的总体分布特征;
- 数字孪生体能利用机器学习,建立设备或生产线的故障模式,并在运行过程中识别该模式后报警;
- 数字孪生体能根据气象等外部条件的变化,预判工厂能耗、安全等未来的趋势,提前给出调整策略;
- 数字孪生体能根据知识库存储的经验等,给出包括总体和各部分的优化路径;
- 数字孪生体能基于人员的年龄分布、培训经历、操作经验等因素的变化,优化出更合理的操作制度和管理流程。

5) 共智

- 具有上下游顺序关系的数字孪生体之间,通过共智能实时把上游的变化

有机地和下游的操作结合起来;

- 具有包含关系的数字孪生体之间,通过共智能实时动态反映体系和系统、以及系统和子系统之间的智慧传递和影响;
- 本地的数字孪生体,可以和云端的数字孪生体发生共智连接,实现跨地域、跨企业的共智;
- 数字孪生体和物理实体之间,通过共智实现同步优化和共同进化;
- 通过脑机接口,人脑和数字孪生体无障碍交互,真正实现你中有我、我中有你。

(四) 数字孪生制造的关键技术

根据数字孪生制造系统的参考架构可知,实现数字孪生体需要多种关键技术。前文已经介绍了其中一部分通用关键技术,包括系统工程、数字线程、物联网、云计算、人工智能、大数据、区块链等。下面聚焦到制造领域,介绍和制造相关的数字孪生体关键技术,包括建模方面的 CAD 技术、仿真方面的 CAE 技术、工艺仿真技术、工厂仿真技术、工业控制技术、辅助制造的 CAM 技术、制造执行的 MES 技术、产品全生命期管理的 PLM 技术和企业资源管理的 ERP 技术。

1. CAD

计算机辅助设计(CAD)是一种应用计算机相关技术辅助人们进行产品或工程设计的的方法和技术,包括设计、绘图、工程分析与文档制作等在内的设计活动。

当前的 CAD 技术具备开放性、标准化、集成化和智能化等特色。现在开发应用软件,一般是在某个支撑平台上进行二次开发,因此要求 CAD 系统必须具有良好的开放性,以满足各行各业 CAD 应用的需要。随着人工智能和专家系统技术的不断发展及在 CAD 中的应用,智能 CAD 系统也得到了重视和发展,它可明显提升设计水平和设计效率。CAD 的云化应用也成为趋势,目前有多种 CAD 技术已经部署在云端,也出现了一些云化 CAD 工具。

CAD 技术从构成上来看分为四层,包括基础核心层、通用平台层、专业应用层和接口工具集。其中,核心层的几何引擎技术是 CAD 的关键技术,包括曲线、曲面的数学表达基础,如 NURBS、数据的组织及内存管理、高精度的曲面求交计算、布尔运算与局部操作等。

在构建智能制造的数字孪生体时,首先需要对物理产品进行数字化表达,这

就需要利用 CAD 技术来完成。CAD 在产品设计阶段、装配阶段和改造阶段，都为数字孪生体提供丰富的数据模型。

CAD 技术还是 CAE、CAM 等技术的前提。CAD 通过丰富的接口程序为这些技术提供三维的模型数据，为数字孪生体在后期的互动、先知、共智等阶段的成长奠定了基础。

2. CAE

计算机辅助工程（CAE）指工程设计中采用计算机辅助分析复杂工程和产品的性能。CAE 软件可以对设备的结构应力、流场、电磁场等问题进行仿真以优化设备性能。近年来，CAE 开发商为满足市场需求和适应计算机硬件和软件技术的迅速发展，对软件的功能、性能，特别是用户界面和前后处理能力进行了大幅扩充，对软件的内部结构和部分模块，特别是数据管理和图形处理，进行了重大改造，使得 CAE 软件在功能、性能、可用性和可靠性以及对运行环境的适应性方面有了大幅提高。

CAE 技术是一门涉及许多领域的多学科综合技术，除了各个求解器本身的算法和模型之外，还包括计算机图形技术、空间离散技术、数据交换技术和工程数据管理技术。

在数字孪生体应用中，CAE 作为重要的仿真工具，可以起到“先知”的作用。CAE 基于第一性原理或称为基于物理机理的方法来预测物理世界的未来状态，这使得人们可以在数字孪生体中提前查看产品的运行是否正常、预知故障何时发生以及故障发生的后果。根据数字孪生体反映出的问题，调整产品设计方案或运行策略，直到对预测的结果满意之后再操作物理实体。这种虚拟先行、实体后动的方法，会减少事故发生、降低设计和运行成本、加快产品迭代进程，提高产品质量和可靠性。

3. 工艺仿真

工艺仿真是利用产品的数字样机，对产品的加工和装配流程等建模，在计算机上实现产品从零件加工到组件装配成产品整个过程的仿真。在建立了产品和资源数字模型的基础上，可以在设计阶段模拟出产品的实际生产过程而无需实物样机。工艺仿真使合格的设计模型加速转化为工厂的完美产品。

工艺仿真利用计算机图形学技术及核心算法，涵盖机加、铸造、表面处理、

工装设计、生产布局、装配、检测等多个专业的工艺过程规划及仿真应用场景。

装配工艺仿真是在虚拟环境中依据设计好的装配工艺流程,通过对每个零件、成品和组件的移动、定位、夹紧和装配过程等进行产品与产品、产品与工装的干涉检查。当系统发现存在干涉情况时报警,并给出干涉区域和干涉量,以帮助工艺设计人员查找和分析干涉原因。

机械加工工艺过程仿真是按照产品的加工工艺,在虚拟环境下重现产品的加工过程。对诸如铸造、锻造、切削、热处理、焊接这样的工艺机理的模拟,通过材料学、传热、固体力学、流体力学等科学计算来判断这些工艺实施的可行性、效率和效果。另一种加工工艺仿真是数控加工仿真,是通过图像学原理来对数控程序进行校正,并不考虑物理机理和工艺实施的可行性。

人机交互工艺仿真是在计算机中建立人、机、环境的数字模型,结合人体生理特征和姿态动作,模拟人机交互的动态过程,并利用人机工程学的各种评价标准和算法,对产品开发过程中的人机工程因素进行量化分析和评价。按照工艺流程进行装配工人可视性、可达性、可操作性、舒适性以及安全性的仿真。

类似 CAE 技术,在数字孪生体中,工艺仿真技术同样是“先知”的支撑技术。不仅能克服传统工艺设计带来的缺陷,还能通过在数字孪生体中提前预测和实时优化,并反馈和控制物理世界的工艺过程,在工艺执行的各个环节避免各种可能发生的问题。

4. 工厂仿真

工厂仿真是对各种规模的工厂和生产线进行建模、仿真和优化。工厂仿真可以分析和优化生产布局、资源利用率、产能和效率、物流和供需链等。

工厂仿真是使用三维仿真软件实现生产线生产过程及产品在厂房内运输过程的模拟。它追求制造资源(包括人、机、料)在空间上有机结合,在时间上适时连接。同时,在布局设计的过程中考虑物流因素,选择搬运的最佳路线,减少物料搬运工作量。此类仿真不仅能降低其过程中的运输成本,还能加快生产流程,最终达到提高生产能力和降低生产成本的目的。

工厂仿真软件使用面向对象的技术和可以自定义的目标库来创建具有良好结构的层次化仿真模型,这种模型包括供应链、生产资源、控制策略、生产过程、商务过程等。用户通过扩展的分析工具、统计数据 and 图表来评估不同的解决方案,并在生产计划的早期阶段做出迅速而可靠的决策。

工厂仿真是开放的,和其它技术有相应接口,如 ERP、工艺仿真、CAD、CAE、CAM 等。这些接口使不同技术之间共享数据,为数字孪生体运行创造条件。

在工厂规划阶段,构建工厂级的数字孪生体,工厂仿真所发挥的先知作用能在多个方面为企业带来价值,包括:避免工厂规划不合理导致的返工、瓶颈及对生产造成的制约;避免投入数量不经济、不合理;避免人力规划不合理造成的员工抱怨或者人力浪费;避免场地面积规划不经济,或者利用率低;避免因生产计划设置不合理造成的生产停线、物料短缺等问题;预测未来,评估工厂极限能力、仓储物流未来的承受能力等;提高规划的效率和效果。

5. 工业控制

工业控制,或称工厂自动化控制,主要是指使用计算机技术、微电子技术、电气手段,使工厂的生产和制造过程更加自动化、高效化、精确化,并具有可控性及可视性。

从 60 年代的直接数字控制(Direct Digital Control)到 70 年代的集散控制系统(Distributed Control System),再到 80 年代的现场总线控制系统(Fieldbus Control System),工控技术发生多次进化。期间,数据采集与监视控制系统(Supervisory Control And Data Acquisition, SCADA)伴随左右。利用 SCADA 可以进行人机交互,如用文字、动画显示现场的状态,并可以对现场的开关、阀门进行操作,还可以通过 Web 发布在互联网上进行监控。

在数字孪生制造系统参考架构中,工业控制处于架构的第二层,它是物理实体和数字体之间的纽带,承担着数据采集和设备控制的任务。工业控制也是数字孪生制造系统中物联网的重要组成部分。没有工控系统,数字世界和物理世界只能是割裂的、没有交互的。

6. CAM

计算机辅助制造(CAM)是指利用计算机辅助完成从生产准备到产品制造整个活动的过程。CAM 通过直接或间接地把计算机与制造过程和生产设备相联系,用计算机系统进行制造过程的计划、管理,并对生产设备进行控制与操作,处理产品制造过程中所需的数据,控制和处理物料的流动,对产品进行测试和检验等。

目前的 CAM 系统在自动化、智能化等方面都有得到了大幅度提高,其基本特点是面向局部曲面的加工方式,表现为编程的难易程度与零件的复杂程度直接

相关，而与产品的工艺特征、工艺复杂程度等没有直接关系。

典型的 CAM 系统由两个部分组成：一是计算机辅助编程系统，二是数控加工设备。计算机辅助编程系统的任务是根据工件的几何信息计算出数控加工的轨迹，并编制出数控程序。它由计算机硬件设备和计算机辅助数控编程软件组成。计算机辅助数控编程软件的主要功能包括数据输入输出、加工轨迹计算与编辑、工艺参数设置、加工仿真、数控程序后处理和数据管理等。数控加工设备的任务是接受数控程序，并按照程序完成各种加工动作。数控加工技术可以应用在几乎所有的加工类型中，如车、铣、刨、镗、磨、钻、拉、切断、插齿、电加工、板材成型和管料成型等。

在产品部件加工过程中，在保证零件表面光洁度和加工精度的条件下，CAM 技术能使加工效率、刀具磨损和能源消耗达到最优。在机械机床运行过程中，使用 CAM 后夹板装卡次数明显减少，机床位置安排也会变得更加科学合理，大幅缩减生产占用面积和生产周期，有效提升生产效益。CAM 软件技术在生产质量检验方面的应用也是产品质量把控的关键环节，利用该技术进行工艺设置和生产操作，不仅可以实现机器运行的自动化，同时还可以对其生产的产品进行标准化质检，对产品质量进行严格把控。

CAM 是一种数字化程度较高的加工制造工艺。相比其他制造工艺，与数字化接近的程度仅次于增材制造，具有数字化原住民的天然优势。因此，它将是除了增材制造外最先被数字孪生制造系统收编、最早为之效力的制造方法。数字孪生体中关于制造的任何风吹草动都可以通过 CAM 在物理世界中体现，反之亦然。数字世界关于制造的任何先知先觉，都可以优化物理世界的制造行为。可以设想，多个数字机床之间的“共智”将在柔性制造和敏捷制造的战场上发挥何等威力。

7. MES

制造执行系统（MES）是一套面向制造企业车间执行层的生产信息化管理系统。MES 可以为企业提供包括制造数据管理、计划排程管理、生产调度管理、库存管理、质量管理、人力资源管理、工作中心、设备管理、工具工装管理、采购管理、成本管理、项目看板管理、生产过程控制、底层数据集成分析、上层数据集成分解等管理模块。MES 系统为企业打造一个扎实、可靠、全面、可行的制造协同管理平台。

MES 可以为制造企业带来生产效率的提高和制造工艺水平的提升。通过 MES

系统的反馈结果,可以优化生产制造过程的管理业务,例如了解到企业产能成本过高、产品质量不稳定的原因,从而及时做出调整。产品生产过程中的数据也为生产管理决策提供了有效的支持,让生产过程的问题及时暴露、及时得到处理。从而有效遏制问题发生,将产品的质量问题和生产线的异常状况消灭在萌芽状态。

从数字孪生制造的角度来看,MES是物理世界的生产过程数字化建模的工具,同时又具有预测与分析潜力。MES具有将生产过程的海量数据尽收囊中、一览无余的优势,如果具有确定性的分析模型,就可以对生产过程进行分析预测,具有先知作用。即使是没有确定性模型,也可以通过工业大数据技术对生产过程进行推测,具有一定先觉作用。另外,在数字孪生制造系统参考架构中,MES承担着人机界面以及和数据线程进行交互的任务,将生产过程与数字孪生体的全生命周期过程建立紧密而深刻的关联。

8. PLM

产品全生命周期管理(PLM)是一种应用于企业内部、以及在产品研发领域具有协作关系的企业之间的,支持产品全生命期的信息的创建、管理、分发和应用的一系列解决方案。

PLM技术主要包含基础技术和标准、信息创建和分析工具、核心功能(如数据仓库、文档和内容管理、工作流和任务管理等)、应用功能(如技术状态管理、配方管理、合规)、面向业务/行业的解决方案和咨询服务等。

从产生过程可以看出,PLM系统作为产品全生命期的数据管理系统,为数字孪生体中的数字线程提供丰富的基础数据。同时,PLM中各个阶段的数据互联互通,也将成为数字线程交互功能的基础。

在数字孪生制造系统中,PLM是数字孪生产品的顶层结构,可以观测产品孪生体的前世来生,掌握其生死存亡和前途命运。具有调遣各种产品建模和仿真相关的数字化工具的能力,也具有收揽产品生命周期各阶段中各类数据的权利,因此也具备了驾驭数字孪生产品的最高权限。在物联网技术的配合下,可以获得与物理产品的互动能力。进而,控制产品、先知、先觉及共智等能力对PLM来说是水到渠成的。

9. ERP

企业资源计划(ERP)由Gartner公司于1990年提出。ERP是将企业所有资

源进行整合集成管理,简单的说是将企业的三大流:物流、资金流、信息流进行全面一体化管理的信息系统。

一般认为 ERP 系统包括订单管理、商品管理、生产采购、仓库管理、物流管理、财务管理等子系统,已经成为企业进行全面管理及决策的平台。

ERP 为企业管理全领域提供了数字化手段。通过 ERP 系统的规范管理,物资库存周转天数减少,库存成本减少,利润率和流动资金周转率得到提高。另外,ERP 系统也能改善公司内部管理结构,减少部门间工作量,提高效益,提升员工素质。

从数字孪生体视角来看,ERP 是企业组织数字化建模工具,是数字孪生企业的顶层结构。可以观测企业孪生体的前世来生,掌握其生死存亡和前途命运。具有调遣各种业务建模和仿真相关的数字化工具的能力,也具有收揽企业生命周期各阶段中各类数据的权利,因此也具备了驾驭数字孪生企业的最高权限。ERP 与其它赋能技术相结合,可以实现企业的综合优化、企业间的协作优化,为企业的自我进化助力。

(五) 数字孪生制造的典型应用场景

1. 研发设计

在制造业的研发设计领域,数字化已经取得了长足进展。近年来,CAD、CAE、CAM、MBSE 等数字化技术的普遍应用表明,研发设计过程在很多方面已经离不开数字化。从产生的价值来看,在研发设计领域使用数字孪生体技术,能够提高产品性能,缩短研发周期,为企业带来丰厚的回报。

可以预见,随着数字孪生体技术的进化,如大数据、人工智能、机器学习、增强现实等新技术进入研发设计阶段后,研发设计将真正实现“所想即所得”。

- 1) 大数据系统会收集产品使用的反馈信息,以及客户对产品的需求变化,这些动态的需求信息是数字孪生设计的输入;
- 2) 根据这些数据,人工智能技术自动完成产品的需求筛选;
- 3) 产品需求会传递给 CAD 建模系统。越来越智能的 CAD 系统将无需人工交互操作,直接实现虚拟建模;
- 4) 虚拟三维模型自动传递给智能 CAE 仿真系统,实现快速性能评估,并根据评估效果进行产品优化;

5) 增强现实技术让研究人员能直接体验虚拟产品, 测试产品功能和性能相关的各项指标;

6) 利用云平台和物联网, 虚拟产品能直接到达用户桌面。用户可以直接参与产品使用体验, 给出反馈意见, 形成新的需求信息。

上述数字孪生体技术支持的研发设计场景是一个闭环, 会动态优化产品的设计过程, 使其更加贴近用户, 也会大幅缩短产品研发设计周期, 支持制造业和服务业的深度融合(图 20)。



图 20 数字孪生体技术驱动产品研发设计示例(来源: DHL)

2. 生产制造

数字孪生体驱动的生产制造, 将会实现无人车间和智能工厂之愿景:

1) 在研发设计端形成的虚拟产品模型, 进入到生产制造端后, 控制机床等生产设备的自动运行, 实现高精度的数控加工和精准装配;

2) 生产加工过程的工艺仿真会实时预测加工后产品的形态和性能评估, 并根据加工结果和装配效果, 提前给出修改建议, 实现自适应、自组织的动态响应;

3) 对于流程制造业, 数字孪生体直接驱动生产线的全过程, 实现智能控制。提前预估出故障发生的位置和时间, 进行预维护, 减少实际故障发生概率, 提高流程制造的安全性和可靠性。

生产制造阶段的数字孪生体和物理制造设备及生产线随时随地动态交互, 共享数据, 在模型的驱动下自我优化, 不断进化(图 21)。



图 21 数字孪生体技术驱动生产加工过程示例 (来源: DHL)

(六) 数字孪生制造的典型应用案例

1. ABB 利用数字孪生体设计物料堆放场

在电厂、钢铁厂、矿场都有物料堆放场。传统上,设计这些堆放场时,设计需求是人为规划的。堆放场建设运行后,却常常发现当时的设计无法满足现场需求。这种差距有时会非常大,造成巨大浪费。

为了应对这一挑战,在设计新的物料堆放场时,ABB 公司使用了数字孪生体技术。从设计需求开始,设计人员就利用物联网获得的历史运行数据进行大数据分析,对需求进行优化。在设计过程中,ABB 借助于 CAD、CAE、虚拟现实等技术开发了物料堆放场的数字孪生体(图 22)。该数字孪生体实时反映了物料传输、存储、混合、质量等随环境变化的参数。针对该物料场的设计并不是一次完成的,而是经过多次优化才定型的。在优化阶段,在数字孪生体中对物料场进行虚拟运行。通过运行反映出的动态变化,提前获得运行后可能会出现的问题,然后自动改进设计。通过多次迭代优化,形成最终的设计方案。

通过运行过程证明,通过数字孪生体设计的新方案可以更好地满足现场需求。而且,结合物联网,设计阶段的数字孪生体会在运行阶段继续使用,不断优化物料场的运行。

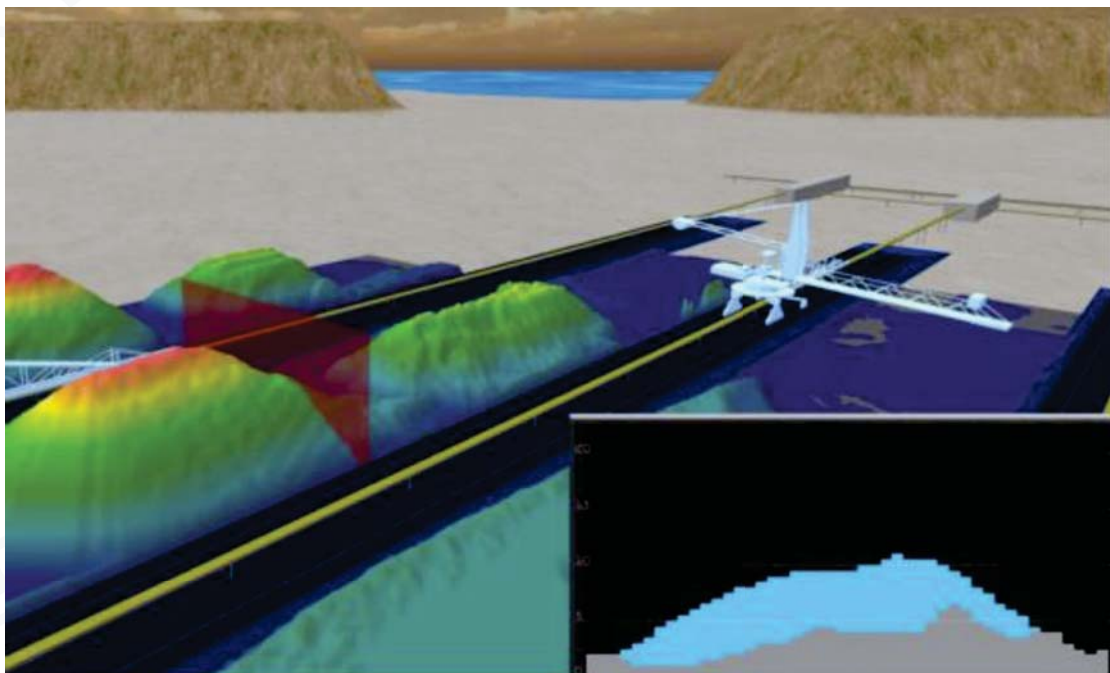


图 22 ABB 利用数字孪生体设计物料堆放场（来源：ABB）

2. 数字孪生机床

机床是制造业中的重要设备。随着客户对产品质量要求的提高，机床也面临着提高加工精度、减少次品率、降低能耗等严苛的要求。

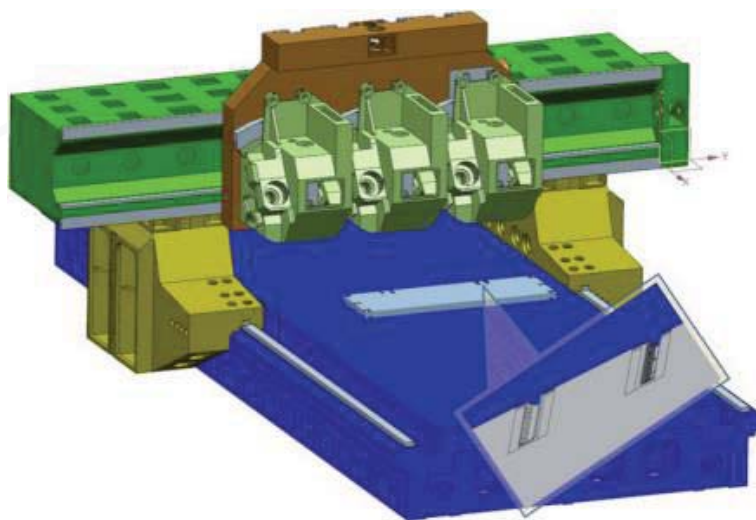


图 23 数字孪生机床（来源：《Twin-Control》）

在欧盟领导的欧洲研究和创新计划项目中，研究人员开发了机床的数字孪生体，以优化和控制机床的加工过程（图 23）。除了常规的基于模型的仿真和评估之外，研究人员使用开发的工具监控机床加工过程，并进行直接控制。采用基于模型的评估，结合监视数据，改进制造过程的性能。通过控制部件的优化来维护操作、提高能源效率、修改工艺参数，从而提高生产率，确保机床重要部件在下

次维修之前都保持良好状态。

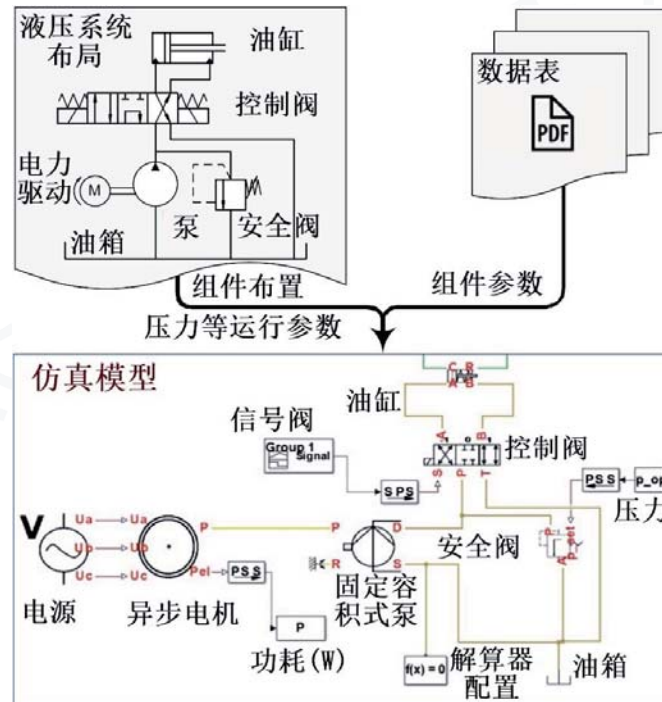


图 24 数字孪生机床的液压控制系统（来源：《Twin-Control》）

在建立机床的数字孪生体时，利用 CAD 和 CAE 技术建立了机床动力学模型（图 24）、加工过程模型、能源效率模型和关键部件寿命模型。这些模型能够计算材料去除率和毛边的厚度变化，以及预测刀具破坏的情况。除了优化刀具加工过程中的切削力外，还可以模拟刀具的稳定性，允许对加工过程进行优化。此外，模型还预测了表面粗糙度和热误差。机床数字孪生体把这些模型和测量数据实时连接起来，为控制机床的操作提供辅助决策。

机床的监控系统部署在本地系统中，同时将数据上传至云端的数据管理平台，在云平台上管理并运行这些数据。

该机床的数字孪生体已经在两个工业项目中做过验证。第一个项目来自航空行业，测试了三台位于 MASA（Logrono，西班牙）的 Gepro 机床。第二个项目来自汽车行业，采用位于法国 Cleon 雷诺工厂的三台 Comau 机床进行了验证。

3. 水泵运行的数字孪生体

水泵在工业中的应用非常普遍。由于运行中来流条件的改变，水泵有可能发生气蚀现象，气蚀会导致水泵叶片损坏，从而过早报废。为应对这一挑战，PTC 公司和 ANSYS 公司建立了水泵的数字孪生体（图 25），展示了数字孪生体如何处理仪表化设备资产所生成的传感器数据，并利用仿真来预测故障和诊断低效率问

题，使操作人员能立即采取行动，纠正问题并优化资产性能。



图 25 基于数字孪生体的服务模式（来源：ANSYS）

泵的入口和出口处配备压力传感器，泵和轴承箱上配备测量振动的加速计，排出侧配备流量计。致动器控制排出阀，进口侧的阀门通过手动控制。传感器和致动器被连接到数据采集设备，该设备能以 20KHz 的频率对数据进行采样，并将数据馈送至惠普公司 IoT EL20 边缘计算系统。PTC ThingWorx 平台创建了一个可将设备和传感器连接到物联网的生态系统，该系统能充分释放物联网数据蕴藏的巨大价值。ThingWorx 可作为传感器与数字模型（包括泵的仿真模型）之间的网关。ThingWorx 的机器学习层可在 EL20 系统上运行，负责监控传感器和其他设备，能自动学习泵运行时的正常状态模式，鉴别异常运行状态，并生成有洞察力的信息和预测结果。

此外，ThingWorx 平台还可用来创建 web 应用程序，以显示传感器和控制数据以及分析结果，例如，该应用程序显示了入口和出口压力，并预测了轴承寿命。增强现实前端将传感器数据和分析结果以及部件列表、维修说明和其它基于部件的信息叠加到泵的图像上，用户可通过智能手机、平板电脑或 VR 眼镜查看。

4. 超临界二氧化碳循环的数字孪生体

上述三个案例属于离散制造业中数字孪生体的应用，本案例是数字孪生体在流程制造业的典型应用。

超临界二氧化碳循环是太阳能光热发电系统中的重要技术。由于该系统在极高的压力下运行，系统的微小参数波动都有可能造成不可预知的事故。这对控制系统提出了严苛要求。

为了应对这一挑战，印度科技学院建立了该系统的实验系统（图 26）。为了实现控制过程的动态仿真，他们开发了基于物理机理的数字孪生体。



图 26 超临界二氧化碳循环实验管网系统（来源：Flownex）

该数字孪生体以一维热流体系统仿真软件 Flownex 为核心，搭建了和实验管网系统完全相同的数字孪生体（图 27）。Flownex 具有强大的仿真能力，可计算气体、液体、气体混合物以及两相流的流动；模拟分析快速变化及慢速变化的动态过程；能够计算流体和固体间的热交换，计算系统各元件的压力变化和换热情况。此外，还具有电气模块和控制模块，可以在仿真系统中添加各种控制元件，能够对瞬态控制过程进行仿真。

利用 Flownex 内嵌的部件模块，如管道、阀门、泵、压缩机、换热器、PID 控制器等，工程师快速建立了系统仿真模型。此外，物理实体的控制设备采用的是美国国家仪器公司（NI）的硬件设备。NI 同时提供了 LabVIEW 软件来采集这些设备的参数，并通过接口传递给 Flownex 软件。在获得现场设备的实时数据后，Flownex 的动态模拟就可以实现实时仿真。

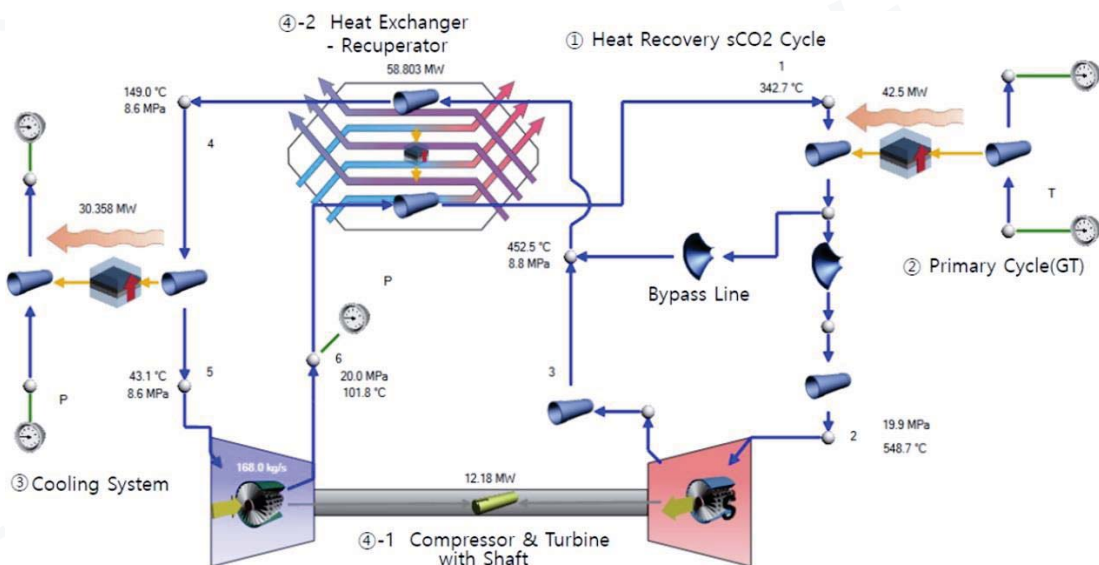


图 27 流程制造过程的数字孪生体 (来源: Flownex)

在超临界二氧化碳系统中，压力远远高于常规的设备范围，其控制系统的小幅度调整，都会对系统产生很大影响。利用 Flownex 搭建的数字孪生体，研究人员能在数字孪生体中模拟各个控制操作引发的后果，确认其满足调试要求后再去操作物理系统，从而保证了该系统的安全运行。

六、数字孪生产业

(一) 现状

产业是指从事国民经济中同性质的生产、服务或其他经济社会的经营单位或者个体的组织结构体系。制造业是产业中提供核心产品的关键组成部分，但要实现从顾客需求到订单和产品，再从产品实物到顾客，还需要商业、物流、服务等产业其他要素的有序整合。

新时代个性化消费的需求，促进了传统制造业的服务化转型。面对批量消费者的个性化定制，不仅是制造企业，更需要整个产业具备更为柔性化的供应链、生产、商业和运维服务。将数字孪生体应用于产业，将在不同领域和层面上帮助实体产业在新模式下迎接挑战，满足需求，“数字孪生产业”便应运而生。而增材制造是促进数字资产和实体资产之间虚实双向转化、敏捷和柔性的解决方案，必将成为数字孪生产业的完美搭档。

1. 批量个性化定制时代到来

在产品极大丰富的今天，消费者完全掌握了话语权。“我要与众不同”的理念已经逐渐成为了新时代消费观念的主流，个性化消费时代已经悄然来临。以满足个性化小群体(如网红粉丝群)乃至个体(私人订制)的 DTC(Direct To Consumer)品牌不断出现，DTC 营销模式也将日益成为主流。

然而要满足消费者的个性化需求并不容易。例如风靡电商行业的网红电商，拥有流量和用户入口，可以与顾客实时互动，挖掘和激发潜在需求，甚至通过商品预发布让用户参与产品设计，但往往缺乏设计能力，也难以建立自己的供应链体系。而对制造商和其供应商来说，网红经济的“快闪”特色也对生产柔性化和供应链及时性带来极高要求(图 28)。一件商品，今天还是流行时尚，一周后可能就是库存垃圾。

而对于工业领域的复杂装备制造，传统上就是“个性化定制”的产业模式，虽然这种定制化模式在产品复杂性、定制化和创新化程度上远高于简单商品。目前产业的挑战是如何将传统以项目模式开展的“个性化定制”，提升为时间和成本上都能够为普通消费者接受的“批量个性化定制模式”。最可行的方式是减少人工干预，用基于模型的 IT 和 DT 平台实现自动化处理。



图 28 DTC 产品营销特色和对供应链及数据的要求（来源：飞马旅创投）

实现“批量个性化定制”需要依据精准营销和供应链模型，进行大量数据交互、销量预测和供应链优化决策，并实现柔性化制造和新品投放预演。构建涵盖全产业链的数字孪生体将是满足以上各种需求的重要解决方案。

2. 数字孪生体在产业中的应用领域

数字孪生体是与实体世界对应的数字化表达方式。一台复杂装备、一条产业链或者一个经济体，都是一个系统或一套体系化实体，可以构建一个“数字孪生体”与之对应。

数字孪生体在产业中的应用领域由点及线和面，包含以下三个主要层面：

（1）构建产品全生命期的数字孪生体：加快产品研发和迭代升级

构建覆盖产品全生命期的数字孪生体，有助于建立产品从研发、仿真、制造到使用的闭环体系，加快产品研发和迭代升级速度。同时，数字孪生体可以成为一个创新的试验沙盒。曾经由于安全性和物理条件限制，让很多操作在真实物理实体上无法完成，现在数字孪生体使之成为可能，比如通过性能仿真、虚拟装配、故障预演等技术来测试和完善产品。

这方面的应用在上一章“数字孪生制造”中已有详细论述，不再赘述。

（2）构建全产业链的数字孪生体：促进产业向“服务型制造”转型

服务型制造是制造与服务融合发展的新型数字化产业形态，未来制造业数字化转型升级的重要方向。

定制化生产是“服务型制造”的典型方式之一，主动将顾客引进产品设计、制造、应用和服务过程，主动发现顾客需求，展开针对性服务。企业间基于平台

合作，主动为上下游客户提供生产性服务和服务性生产，协同创造价值。

构建从顾客、市场需求、供应链和物流体系、维护保障等全产业链的数字孪生体，基于各领域模型的系统工程整合，有助于促进传统产业向定制化生产模式转变，实现更为敏捷和柔性（JIT）的商业模式。

例如在消费品行业，Adidas、Nike 等制鞋头部企业成立其数字化战略部门，通过对 IT 和 DT 厂商的并购整合，建立围绕鞋产业的数字孪生体，实现 DTC 定制化生产和网络营销。从传统分销运动鞋的商业模式，延伸至包括跑团社交、训练培训、相关装备营销、赛事活动组织等运动产业。

（3）构建实体经济的数字孪生体：促进数字经济发展

数字经济在推动产业经济发展、提高劳动生产率、培育新市场、发掘产业新增长点、实现包容性增长和可持续增长等诸多方面，都发挥着重要作用。

数据经济的核心在于“数据”驱动发展，而不像工业经济是“石油”和“机械”。通过建立实体经济的数字孪生体，对“数据”进行资产化，并建立一整套金融等数字化服务体系，在模拟决策、引导资源快速优化配置与再生等方面，可以极大地降低社会交易成本，提高资源优化配置效率，提高产品、企业、产业附加值，从而推动社会生产力快速发展。

例如阿里巴巴构建了聚集消费者、供应链和制造商的网络电商平台，成为一个年营收超过世界 80% 国家 GDP 的经济体。阿里巴巴同时也构建了一个共智的数字孪生经济体，消费者和供应商等每个个体都是其中的一个数字孪生体，通过精准画像建立信用体系、支付系统和个性化金融等服务产品。

3. 增材制造是数字孪生产业的完美搭档

增材制造是近 30 年发展起来的一种微积分式的制造方式，在设计阶段将数模切片微分，制造阶段则在微米级通过精确控制材料堆积的方式积分成型。

增材制造使设计师突破传统制造工艺的束缚，实现全新的产品设计，从而在实现产品减重（如航空航天领域）、私人定制（如骨科植入物和制鞋领域）以及全新产品设计（如梯度混合材料设计、成型中嵌入传感器的智能产品）等方面，为设计师拓展了无限的空间（图 29、图 30）。

增材制造技术的发展，极大地促进了数字孪生体的“数字资产”和“物理实体”之间的虚实双向转化。

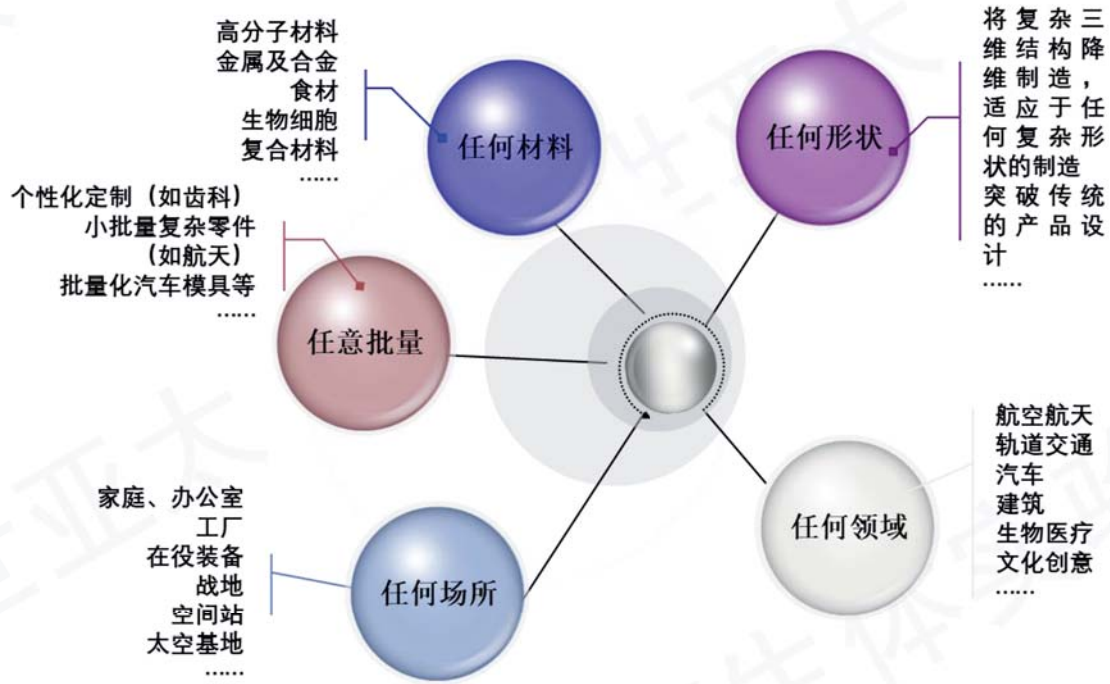


图 29 增材制造突破传统产品设计和制造的限制 (来源: 卢秉恒院士)

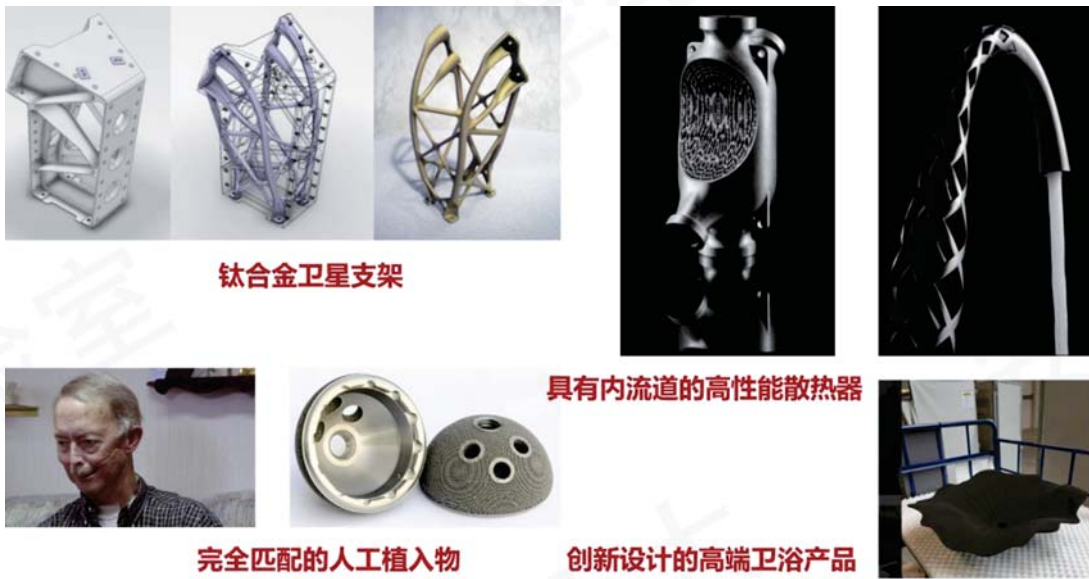


图 30 增材制造突破传统产品设计的限制
(来源: Conflux、DXV、Gersthofen 和网络公开资料)

(1) 由虚向实，快速简便实现数字资产的实体制造

由于不用开模，增材制造对于单件生产和批量生产的成本相差无几，特别适合个性化定制的生产模式。

基于增材思维的产品是整体化设计、一体成形，在产品减重的同时，性能和可靠性也大大提升。

整体化设计减少了供应商和库存，由原来的零部件库存管理变为原材料库存

管理，按需制造。同时原材料管理也变得更简单，只需储备基本的金属元素粉末和 高分子丝材，各种合金材料可以在打印过程中通过控制配比实现。增减材一体化的制造设备有助于实现基于网络的分布式制造，以及支撑小型设计工作室环境的 按需打印。对于大型装备还可实现现场修复，并简化备件保障。

因此，增材制造是实现定制化生产柔性和及时性(JIT)的重要支撑(图 31)。



图 31 增材制造技术对产业的影响

(2) 由实向虚，全数字化制造为数字孪生体提供宝贵的过程数字资产

增材制造是一个全数字化的制造过程(图 32)。数字化是增材制造技术的天然属性，没有数字化就无法实现增材制造。而且增材制造的数据链是全过程的，从产品设计、仿真优化、工艺参数、加工制造、包装检测到全生命期的维护保障都可通过全数字化过程实现。因此每个增材制造的产品，天然就是一个数字孪生体，包含全生命期信息。

增材制造全过程产生的数据和算法是核心的数字资产，如在线积累的增材工艺数据包、基于材料在线优化的增材工控算法等。增材工艺仿真优化算法与设备可以相对分离，仿真升级后新的工艺数据和优化算法，通过在线升级可使制造工艺水平和产品质量得到持续优化和提升。

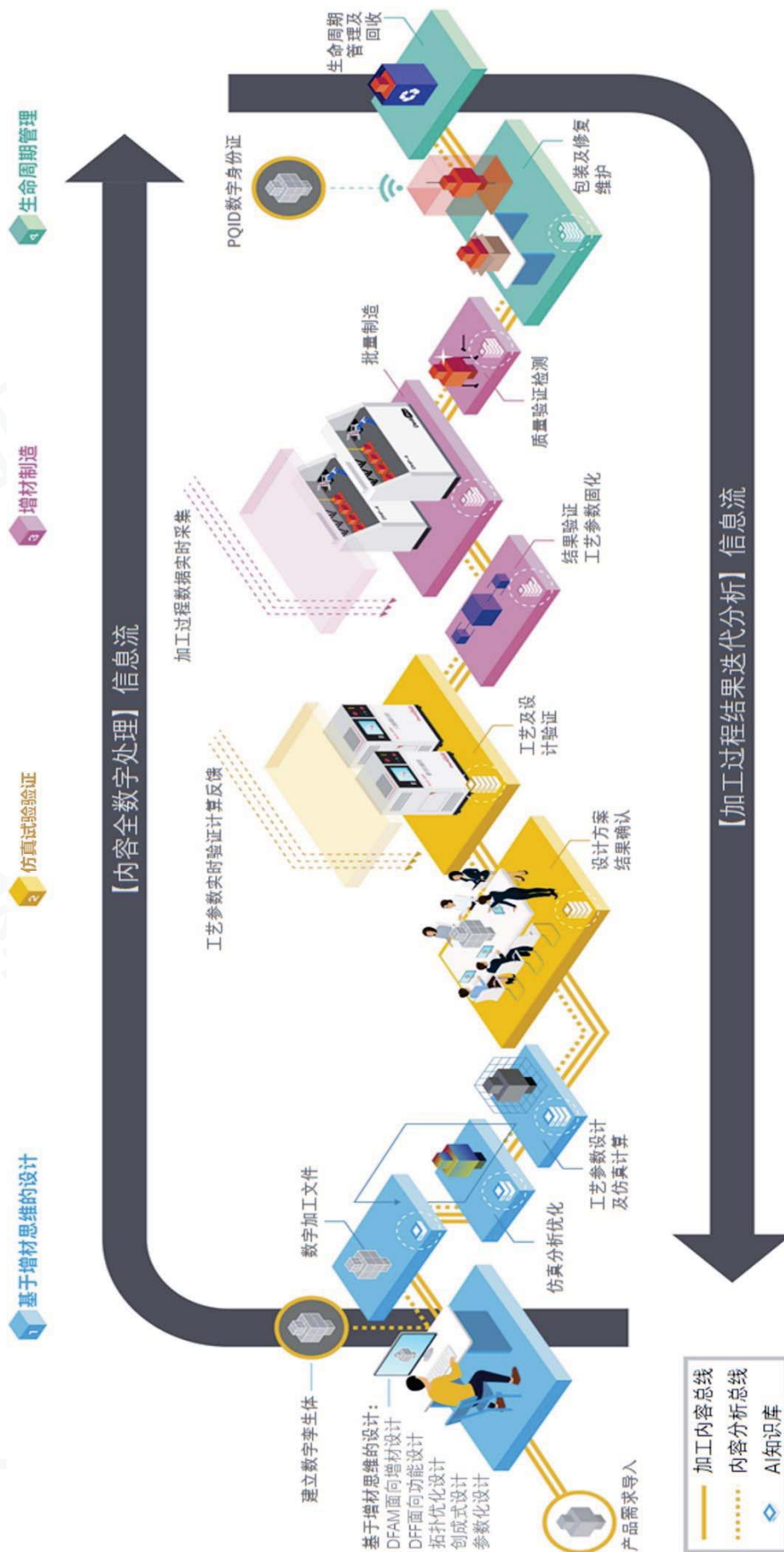


图 32 全数字化的增材制造全过程 (来源: 安世亚太和德勤)

由于产品是在工艺参数包的控制下积分制造出来的,因而可以严格控制 and 记录产品的成型过程。这些过程数据对于提升质量、运维保障及产品迭代升级都极具价值。

增材制造的天然在线和数字化的特性,以及材料、设备和生产线的通用性,使得增材思维下的产业具有天然的柔性、敏捷性、数字化、在线化和服务化等特征。如果说传统制造模式下的产业形态进行数字孪生体的建设需要较多转型和变革,那么增材思维下的产业天然就是数字孪生产业。传统产业在增材思维的加持下,向数字孪生产业转型能够事半功倍。因此,我们提出“增材制造是数字孪生产业的完美搭档”这一论断。

(二) 综述

数字孪生体以云计算、大数据、物联网、人工智能和区块链等 IT 和 DT 使能技术为支撑,与行业趋势和产业升级需求相结合,构建实体的数字镜像。通过多种组合集成形式,按照数字化、互动、先知、先觉、共智的顺序逐渐深入应用,最终实现“服务型制造”和“数字经济”等产业发展目标。

数字孪生体与各种 IT 或 DT 使能技术结合,在复杂产品的产业链中具有广泛的应用价值。本节聚焦于讨论如何构建全产业链的数字孪生体,同时与增材制造技术相结合,促进传统产业向智慧化和服务型制造转型,迎接批量个性化定制时代的到来。限于篇幅和聚焦价值,在市场营销和电子商务、供应链和物流领域,侧重于讨论如何面向“批量”订单的挑战;在产品使用和维保领域,则侧重于讨论如何迎接“复杂”产品高可靠性的挑战。

数字孪生体在全产业链上的应用,除研发和制造领域外(见数字孪生制造章节),还在市场营销、供应链物流和维保服务三大领域发挥巨大作用。

1) 市场营销和电子商务领域

以淘宝和京东等为代表的电商平台,已经积聚了大量在线客户。以目标客户在线访问记录推送相关的产品,还只是电子商务营销的初级阶段。如果以消费心理学的消费者分类和评估模型为依据,建立消费者的数字孪生体,以网络行为作为数据源不断完善消费者的精准画像,进行精准营销或者 APP 自动页面优化等,将取得更好的消费者粘性和营销效果。

同时,在消费者的日常生活中,在线购物只是时间占比很低的活动。而从更

广义的时空来看,建立覆盖消费者社交群体、地理位置信息等在内的更高级别数字孪生体,就是社交电商(如微商)和位服电商(基于位置信息服务)的营销模式。从被动搜索到主动影响,营销效果取决于数字孪生体构建的模型和范围,建立消费者的数字孪生体将可实现完全个性化的精准营销和需求满足。

2) 供应链和物流领域

供应链管理就是使供应链运作达到最优化,以最低成本和最高效率实现从采购开始到满足最终需求的所有过程。在传统供应链管理模式中,供应链系统复杂、效率低、响应速度慢,存在不可预测的风险,经常因信息掌握不及时而导致决策失误。

过去十年中,供应链运营领域发生了巨大变化。物联网技术出现后,连接无处不在,供应链中几乎任何物品都可以实时跟踪。同时,第三方也可以为供应链运营企业提供新形式的数字信息,例如精确的天气预报信息以及交通预警信息等。技术的进步允许我们建立一个供应链和物流体系的数字孪生体,可以带来产业运营模式的巨大进步。

增材制造技术也深刻影响了供应链和物流体系。例如不再需要储备传统的零部件库存,而只需保存产品的数模。这样可在物流网络的最佳节点,通过3D打印服务中心按需制造,大大降低供应链成本和缩短交付时间。

3) 产品使用和维保领域

当工业装备意外发生故障时,导致的往往不只是更换设备的费用,而是被迫停机。一条生产线静止不动时,可能意味着每小时成千上万的损失。对于一些关键场合和装备,比如高温高压的化工生产线或航空发动机,甚至面临巨大的安全风险和衍生灾害。

保持工业装备正常运行的措施是进行维护,包括预测性维修和预防性维修。两者的区别在于:前者依靠的是传感器和预测,后者更多还是凭经验定期维护。预测性维护可以让企业更早发现故障设备,节省停机带来的额外成本。

但要实现预测性维护需要大量历史数据的支撑,还需要建模来对这些数据进行归纳和处理,同时依据实时采集的信息不断进行仿真和预测。

任何预测性维护的应用中,核心是传感器数据和用来训练故障检测的分类算法。在典型故障条件下,不可能总是从现场物理设备中获取数据。让现场发生故障会产生灾难性的后果,并致使设备损坏。而在可控情况下故意制造故障,同样

会带来昂贵的后果，甚至难以实现。

解决这一难题的方法就是创建设备的数字孪生体。以航空发动机为例，GE 和 RR 等行业头部企业均已将数字孪生体技术应用于航空发动机的预测性维修保养服务。他们甚至改变了营销模式，从销售发动机产品，到销售“运行时间”。

增材制造技术为可预测性维护提供了更多产品制造过程的参数数据，使得产品模型更为全面，预测更为准确。对于某些特定场合，例如远洋舰队的运维保障，甚至可以将增材制造设备安装到舰艇上，现场打印损坏的零件，从而降低对备品备件的要求。

总之，对消费者的个性化产品需求、独特采购模式以及使用习惯进行精准判断之后，增材思维下的数字孪生产业将提供完美支撑。首先创成式设计使消费者可以互动参与到产品设计中，通过 VR 和 AR 等技术即时看到设计效果并提出修改期望，直至得到独一无二的定制化产品；其次可以在消费者希望的就近地点、适宜时间进行制造；再次，可以在装备应用现场提供必要的运行、维护、维修、更换等服务；最后，以上这些所谓的“定制”和“现场”，并不增加成本，消费者没有额外经济负担，提高了产品全生命期的投资回报率。这些都是数字孪生体和增材制造结合带来的效益。

（三）数字孪生产业参考架构

1. 参考架构

实现传统产业向数字孪生产业的转型：一是建立企业内部的生产制造和组织管理体系的数字孪生体，提高作业、计划、决策的精准性、灵活性和智能化水平，提高生产运作和企业运营效率；二是在企业外部建立产业的数字孪生体，通过数字化、网络化方式加强与客户、供应链上下游、运维保障等合作伙伴的协同，来提高供应链的稳定性和柔性，进而带动整个产业链的效率提升。

因此，从物理实体到数据收集和控制，以及构建数字孪生体和应用的角度上看，数字孪生产业系统的参考架构如图 33 所示。

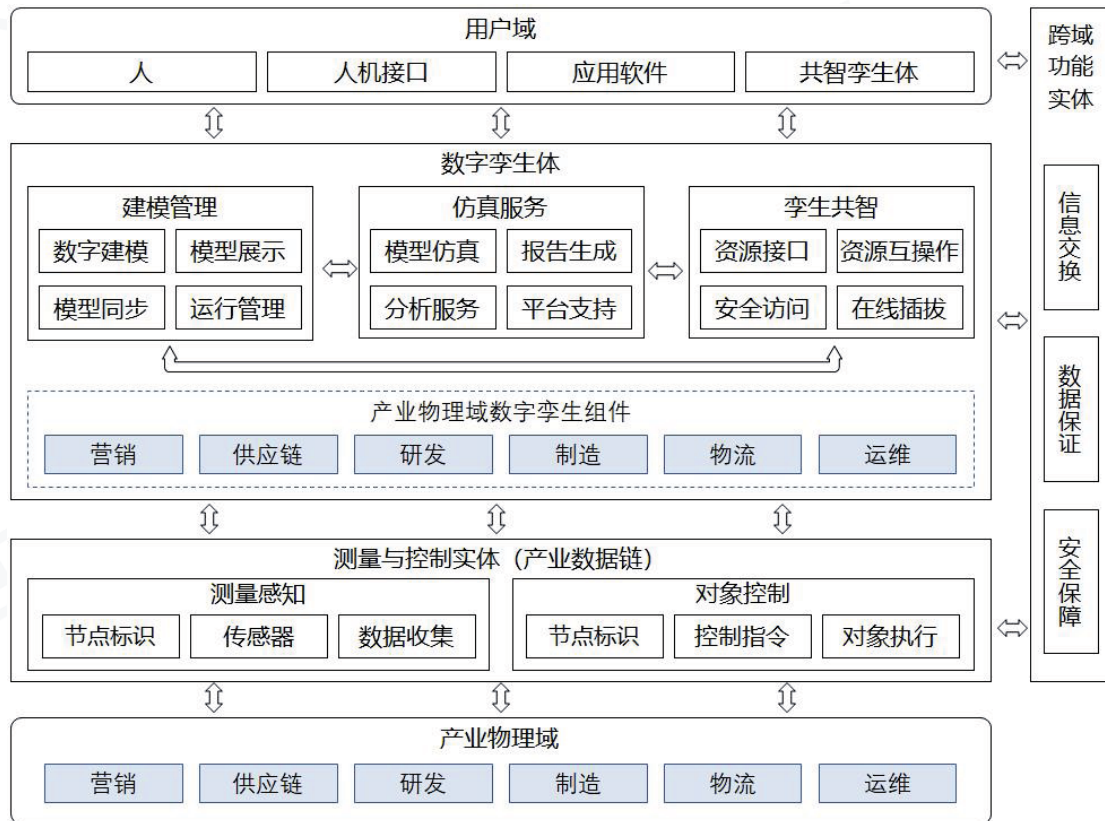


图 33 数字孪生产业系统的参考架构

基于第三章数字孪生系统通用参考架构，数字孪生产业系统在产业物理域及其数字孪生组件依据产业特色进行了实例化：

1) 产业物理域

主要是指包含营销、供应链、研发、制造、物流、运维等全产业链各环节的各种物理实体对象以及相关的业务活动。

2) 数字孪生体

数字孪生体包括与产业物理域实体和活动相对应的数字孪生组件和数字孪生体管理支撑功能两大部分。

2. 数字孪生产业的成熟度特征

按照数字孪生体成熟度模型，数字孪生产业系统在各成熟等级上的典型特征如下：

1) 数化

- 对于消费者和客户建立了用于精准画像的模型。模型涵盖消费者分类、消费偏好、消费记录等属性，支持大数据精准分析的需要，并加以应用；
- 对于供应链和物流进行多参数和多目标建模。模型涵盖供应链各节点的

参与者、物流容器、运输工具、仓库等货运基础设施，以及天气、节假日影响因素等，支持物流仿真和规划等应用；

- 对于产品全生命期建立数理模型。模型覆盖产品从需求、设计、供应链、制造、交付和使用环节完整信息，符合 PLCS 等国际标准支持，支持过程追溯；
- 对于产业链整体建模。模型包含以上全产业要素，以及产业经济等影响因素，能够对全产业进行可视化，以及支持产业规划、产业资源整合、沙盘模拟等应用；
- 通过物联网或云平台等 IT 和 DT 工具对所需的数据进行采集，确保完整性和准确性。

2) 互动

- 消费者数字孪生体能够及时记录消费者订单记录和消费偏好变化，不断完善和修正其精准画像。数字孪生体分析的结果也可及时传递到电商等在线交易平台，能够潜移默化的影响消费者决策；
- 供应链和物流数字孪生体能够真实反映其运行状况，如追踪货物运输路径、供应链和物流各节点的实时仓储和饱和状况等。数字孪生体的决策结果也可正确传递到供应链和物流管理的业务系统或工作人员，指导和影响业务运行；
- 产品全生命期数字孪生体能够及时完整地采集来自需求、设计、供应链、制造、交付和使用环节完整信息，特别是使用阶段的动态信息，通过数字孪生体预测分析，能够为产品研发、制造和维护保养提供有效支持；
- 集合以上因素，面向产业链的数字孪生体，能够为地方政府、行业决策部门提供多种维度、视角及随时间演变的可视化大数据平台，支持相关部门进行决策支持，为产业规划、招商引资和产业政策制定提供支撑；
- 通过物联网、云平台等提升动态数据采集的及时性和有效性，应用大数据、BI 等技术提高数据展示的可视化水平；
- 将数字孪生体与相关领域的业务系统相关联，提高决策和实施的自动化水平。

3) 先知

- 对于消费者和市场领域，预测消费者潜在购物需求、产品销量和市场潮

流趋势;

- 对于供应链和物流领域, 预测供应链生产和交付时间、货物物流时间、物流瓶颈、库存变化和预警、风险事件的预测等;
- 预测复杂装备使用过程中的故障隐患和趋势, 实现预测性维护;
- 综合以上因素, 预测产业链发展趋势, 包括市场需求、厂商营销动态、供需平衡及产业 GDP 走势等, 确保数字经济目标的实现;
- 将产品仿真、系统仿真、物流仿真等技术深入应用到各领域的预测中, 不断根据真实世界的反馈数据, 依据同步速率进行收敛, 提高仿真预测的精确度。

4) 先觉

- 帮助消费者发掘新的潜能, 给出超出个人认知局限的建议。如根据其他类似人群的分析, 从简单推荐一个好吃的餐厅, 到帮助消费者发掘一项新的兴趣爱好, 开拓一个新的知识技能领域等;
- 将人工智能应用到市场预测中, 发现和预测潮流趋势, 促进消费和指导生产;
- 帮助商户发现新商机, 从简单的“啤酒加尿布”的摆放组合优化, 到帮助其选择产品, 整合供应链, 以及获得资本和信贷支持, 开创一个全新的商业版图;
- 通过对产品需求变化的预测, 对供应链全局进行分析和规划, 制定合理的生产、库存和物流计划;
- 对于在整体系统和复杂环境中运行的高端装备(如风力电场、航空发动机), 应用深度神经网络等人工智能和大数据技术, 快速精准地进行故障定位和系统运维优化。

5) 共智

- 多个数字孪生体之间共享智慧, 共同进化。在现实社会中是人与人、企业与企业之间不断碰撞, 因缘际会。在数字世界则是数字孪生体之间的碰撞和整合, 模型延伸, 数据交互, 资源互补;
- 消费者数字孪生体与物流数字孪生体交互, 依据消费者习惯和订单内容, 规划“最快路径”、“最便宜路径”、“最短路径”、“拼单路径”、“顺路路径”等;

- 消费者数字孪生体与产品数字孪生体交互,实现个性化定制的智能产品,并且在产品使用过程中源源不断地产生数据,制造商提供长期的持续服务,如“可穿戴设备”和延伸服务等;
- 供应链数字孪生体与产品数字孪生体交互,结合增材制造技术,提供最优化的备品备件保障策略;
- 跨界的数字孪生体也可进行交互,实现更大范围的“共智”,例如物流体系、无人驾驶智能汽车、城市交通等数字孪生体的跨界交互;
- 通过对市场趋势、供应商和生产者的能力评估、物流潜力等产业链资源分析,以产业趋势和商业目标为导向,多个数字孪生体之间交互,自动实现社会资源的快速高效整合。

(四) 数字孪生产业的关键技术

数字孪生体在产业的应用,需要大量 IT、DT 等技术作为支撑。由于产业领域广泛,涉及的技术方方面面,以下仅对关键技术作具体介绍。

不同技术支撑不同的应用场景,例如:云平台、大数据、物联网、人工智能、区块链等使能技术是构建产业数字孪生体实现平台的重要基础;创成式设计、增材制造、AMES 等技术带来设计和制造领域的新突破;以物流仿真为代表的系统仿真则为整个产业的优化提供了支撑。

其中大数据、云平台、区块链技术等通用技术已在“数字孪生体的关键技术”章节中有详细介绍,此处不再赘述。其他几项技术简要介绍如下:

1. 创成式设计

“创成式设计”是由“Generative Design (GD)”翻译过来的一种对设计系统和方法的表达。早期通常翻译为“生成式设计”或“衍生式设计”,有些文献和书籍上称这种方法为“算法辅助设计(AAD——Algorithms-Aided Design)”或“计算性设计(Computational Design)”,建筑领域的人们习惯称之为“参数化设计”。

这种方法起源于建筑领域,最近十年中在建筑设计和视觉艺术领域得到广泛应用,但制造业领域的人还对其了解甚少。近几年,随着增材制造技术的成熟,人们发现“设计”成了制约增材制造价值发挥的瓶颈。于是 GD 方法开始引入产品设计领域,并率先在工业设计、珠宝设计等领域开始应用。

近两年,各大 CAD 厂商都相继推出自己的 GD 产品,代表制造业产品设计已经迈进 GD 时代。同时国内出现了“创成式设计”的翻译表达,包含了对这种方法的更深层次的理解,更明确了计算机及算法在设计过程中帮助设计师创新和探索更广泛的解决方案的能力。

创成式设计是 CAD/CAE/OPT 技术的融合。其设计产品的路线是:首先通过 CAD 工具完成产品的初始实体建模;再通过 OPT (Optimization, 优化技术) 进行优化;优化后的模型在 CAD 系统中进行重构;利用 CAE 工具进行仿真验证;对比几种优化方案后,选择最优的一种。

创成式设计突破了设计极限,而号称“没有造不出的原型”的增材制造技术为这类产品的加工提供了有利保证。反之,增材制造技术的价值也需要创成式设计来体现,因为增材制造不仅在于制造的变革,更是对设计的解放。优化和创新到极致的设计,其结构往往也是复杂至极的,就像已经进化了几亿年的生物。而只有增材制造才能满足这种极致复杂的设计。因此创成式设计与增材制造的融合是企业创造出突破性创新产品的重要途径,且这两项技术的融合正在颠覆传统,改变着设计制造的模式,是企业数字化转型的关键所在。

创成式设计同时是数字孪生体关键技术——建模技术中的一种,在基于增材思维的数字孪生产业中具有比其他建模技术更独具特色的价值。与传统建模技术相比,创成式技术更善于设计出富有创造性和定制化的产品,客观上也促进了整个产业的敏捷和柔性的提升,使得数字孪生产业模式相较于传统产业模式表现出更为明显的优势。

2. 增材制造

增材制造是融合了计算机辅助设计、材料加工与成形技术的新型制造技术。它以数字模型文件为基础,通过软件与数控系统将专用的金属材料、非金属材料以及医用生物材料等,按照挤压、烧结、熔融、光固化、喷射等方式逐层堆积,制造出实体物品。

自 20 世纪 80 年代末,增材制造技术逐步发展,期间也被称为“材料累加制造”、“快速原型”、“分层制造”、“实体自由制造”、“3D 打印技术”等。美国材料与试验协会 (ASTM) F42 国际委员会对增材制造给出了定义:增材制造是依据三维模型数据将材料连接制作物体的过程。相对于减法制造,它通常是逐层累加

的过程。增材制造技术使用能源有激光、电子束、紫外光等，采用的材料有树脂、塑料、金属、陶瓷、蜡等。因其采用的成型方法和使用的成型材料以及依靠的凝结热源不同，现在主要分为四类：分层实体制造(LOM)工艺技术、立体光刻(SLA)工艺技术、选择性激光烧结(SLS)工艺技术和熔融沉积成型(FDM)工艺技术。

增材制造技术不需要传统的刀具、夹具及多道加工工序，利用三维设计数据在一台设备上可快速而精确地制造出任意复杂形状的零件，从而实现“自由制造”，能够实现许多过去难以制造的复杂结构零件的成型，并大大减少了加工工序，缩短了加工周期。而且越是结构复杂的产品，其制造的速度优势越明显。近20年来，增材制造技术得到了快速发展，增材制造原理与不同的材料和工艺结合发展出了许多增材制造设备，目前已达到20多个种类。这一技术在各个领域都获得了广泛的应用，如电子产品、汽车、航空航天、医疗、军工、艺术设计等。

增材制造的好处可以从两个方面来理解，一个是生产效益，另一个是产品生命周期效益。生产效益专注于制造过程，包括减少材料消耗，缩短交货时间，最小的模具成本，降低装配成本等。产品生命周期效益是指在使用增材制造出来产品的过程中，来自如减重带来的燃油效益、更高的性能和可靠性、更长的寿命、更快的新产品推出、市场响应速度、减少库存以及更好的适应性和更具吸引力的产品附加值等等。

增材制造是全数字化的制造过程，无论是其制造的产品，还是制造过程本身，都是一个天然的数字孪生体。基于数字孪生体技术和增材制造深度融合的平台环境，能够帮助企业从设计制造直至市场营销、销售、交付，为所有利益相关方创建一致、综合全面的服务体验，更好地满足未来大批量定制化的制造需求。在增材技术的加持下，使传统制造模式所不能获得的营销、供应链及运维服务等产业各环节中的柔性、敏捷及快速响应成为可能，让数字孪生产业的价值可以得到充分的挖掘。

3. 增材制造执行系统 (AMES)

随着增材制造技术的创新发展和产业制造领域的逐步引入，基于增材制造技术的制造执行过程管理已产生了较大的变化，其特点包括：

- 零部件变少，单一库存管理简化；
- 工艺流程和生产线排产过程大大简化，单台设备即工厂与全球化分布式

制造增大排产难度；

- 微观至宏观的积分式制造使增材制造设备需要获取的数据量、数据传输、监控分析算法与传统数控加工中心（CNC）有数量级的差距；
- 用户个性化订单大量增加，营销系统对实时报价要求提高；基于数字式驱动、分布式仓储生产、云管理、IP 等方面有着更高的安全要求；
- 增材制造过程质量管理从宏观进入到微观、从定性转变为定量，带来包括仿真优化、工艺包参数的执行与分析、设备预测性维护、逐个产品基于制造生成参数与设计工艺参数、大数据分析等新的价值与挑战。

以上变化催生了面向增材制造的制造执行系统(即 AMES)。通过 AMES 系统，3D 打印用户能够用一体化的软件管理增材制造流程，减少人工管理的环节，使 3D 打印机操作人员专注于技术，而不是执行琐碎的打印管理任务。随着增材制造工艺更深入的应用于产品制造过程，AMES 对产品增材制造过程动态管控和质量追溯等方面发挥的价值将越来越大，同时其应用功能也会越来越丰富。

基于此目标，AMES 应用了包含机器视觉、数据修复及安全管理、在线自动化检测和监控、机器自主学习、智能算法等多项技术的集合。

作为数字化增材制造执行管理平台，AMES 系统可通过不同的模块组合配置来帮助企业选择最佳增材制造解决方案，并实现增材制造自定义工作流程的标准化控制。它包含多种不同模块功能，对企业增材制造过程进行动态监控、在线质量检测，并对增材制造设备性能与效率进行分析评估，协助企业提升增材制造产能。同时它可以无缝导入 AM 工作流程，协助企业实现报价、CAD 编辑、版本控制、调度和实时数据驱动等业务全过程。还可以通过开发的机器视觉系统来在线监控 3D 打印过程，并通过机器自主学习等功能无缝捕捉机器所产生的数据，该数据可被自动关联到其他在打印过程中产生的数据，如修补和切片信息、打印件所有者的源数据和第三方传感器数据，实现企业增材制造过程的数据可追溯性和安全管理。通过硬件与软件的整合，AMES 系统将确保增材制造过程本身具有可重复性和可追溯性，保证增材制造过程质量。最后，它还可以协助企业预估设计成本。

大数据驱动的 AMES 使得增材制造工厂运行透明化、车间管理精准化、产品质量一致化、产线效率最优化、设备运行平稳化，推动了增材制造全生命期的协同优化。AMES 能更好协助客户基于增材制造设备的历史数据分析风险因素、潜

在故障、所需维护以及业务场景等,为预测性分析提供支持。利用接收到的数据,算法可在虚拟世界进行模拟,以预测与优化增材制造设备在特定环境下的性能和生产效率等。总之,基于 AMES 可建立增材制造生产过程的数字孪生体,通过对其仿真、大数据预测、优化并反向控制物理生产过程,达到物理生产过程的效益最大化。

4. 物流仿真

物流仿真技术是借助计算机技术、网络技术和数学手段,采用虚拟现实方法,对物流系统进行实际模仿的一项应用技术。它需要借助计算机仿真技术对现实物流系统进行系统建模与求解算法分析,通过仿真试验得到各种动态活动及其过程运行的模拟结果,进而研究物流系统的性能和输出效果。

物流仿真是对现代物流系统的一种虚拟仿真活动,它已成为产业或企业战略管理、系统分析、运筹统计、预测决策、宏观或微观管理等领域的有效工具。物流仿真技术的应用为物流企业的配送中心、仓库管理系统、分拣系统、运输系统以及货物的实时跟踪提供了一种评价的方法。物流仿真软件主要应用于企业内部生产物流仿真、企业仓储、运输和配送流程仿真、物流咨询仿真以及高校物流专业仿真研究学习等。

基于数字孪生体的物流仿真应用有着十分重要的价值,包括:

- 1) 通过对整个工厂生产物流系统进行仿真,可以及早发现工厂生产布局规划中的缺陷和错误,使工厂生产布局规划质量得到保证;
- 2) 通过基于生产物流系统的仿真分析和优化,提高了新设工厂产能布局规划的效率和效果,为企业节约投资资金,并可通过虚拟运行预知未来工厂的产线运行状况和极限能力,确保投资安全有效;
- 3) 通过数字孪生体对物流系统实时预测和优化,反向控制物流设备和调配物流人员,并将物流信息传递给生产、营销和运维端,让产业达到整体最优。

(五) 数字孪生产业的典型应用场景

1. 市场营销和电子商务

随着传感器增加、配件逐渐丰富(如可穿戴装备)和 APP 智能化程度的不断提高,手机作为物联网的终端将会采集种类越来越多、时间占比越来越大的消

消费者信息。从健康信息、社交网络、阅读偏好、出行信息、饮食喜好、支付习惯、财务状况等等，手机可能比消费者本人都更了解自己。目前这些数据大量分散在不同 APP（公司）中。把这些数据整合起来，并且潜移默化的影响消费行为，将带来巨大的市场价值。这也是移动互联网巨头们并购整合，坐拥千亿市值的根本原因。当然还有很多手机之外的数据，也对市场营销和电子商务产生重大影响，例如政策法规、行业信息等，其数字化程度不等，可以通过与其他数字孪生体“共智”获得。

通过消费心理学等模型构建消费者数字孪生体，将有助于形成更完整和精确的消费者画像。消费者数字孪生体包含多领域的信息，包括静态信息（如性别、籍贯、毕业院校等）和动态信息（如健康、社交、阅读、出行、饮食喜好、支付习惯、财务状况等）。这些领域的数据模型、数据采集和应用实际往往已经比较成熟，例如健康信息和运动规划、社交网络和新友推荐、阅读偏好和知识付费、出行习惯和路径规划等等。通过对这些模型和数据的整合应用，数字孪生体可以挖掘更高的价值。

构建的消费者数字孪生体应便于按不同维度进行分类。如：按年龄分少年（决策自主权有限、易受参照群体影响）、青年（追求时尚和新颖、容易冲动、易受情感影响）、老年等；按性别分男性（购买动机具有被动性）、女性（追求美观、时髦）；按家庭状态分单身消费、情侣消费、母婴消费等；按社会阶层和地域特色等等。

同样类别的消费者，也可能有相同（大概率）或不同的消费心理。例如：求实、求美、求便、攀比、从众、占有、怀旧、面子等。依据不同消费心理建立评价量表，通过对消费习惯的数据采集和积累，进行消费习惯的精准画像。

同时大部分的消费行为是可以预测的，例如周期性的电商超市购物、换季换衣、假日经济、相同社群的时尚潮流等。通过精准的产品推送、定价策略、限期打折措施、网络营销等“互动”措施，可对消费行为施加影响。

不同消费者数字孪生体之间的“共智”，还将促进消费和提升消费体验。例如：开发“基于位置信息的服务”，在合适时间路过某地，推荐附近喜好的美食；开发“基于社交网络的电商”，在跑步社群推荐合适的活动赛事和装备；根据消费习惯和支付模式开展定制化的消费信贷；或者通过精准的匹配模型研究（同类或互补等），基于多方位要素开展“婚恋电商”，帮单身者找到冥冥之中“八字相

合”的另一个TA。

这其中“消费者体验”是关键，体验的优劣决定电商应用的成败。同样的模式是“帮助”还是“打扰”因人而异，消费者需要差异化的策略和解决方案。

当然，在构建消费者数字孪生体的过程中，同时应加强隐私保护和防止数据滥用，在法律的框架内进行。

完成消费者画像后，增材制造技术将为追求“个性化”、“时尚”、“价格不敏感”、“愿意参与设计”的消费者，提供与众不同而价格又在可接受范围内的产品。

消费者可以参与以创成式设计驱动的自动化设计过程，个性化定制自己的产品，并通过VR、AR技术在线观察和修改虚拟产品（图34）。设计系统内嵌了仿真等技术，在满足外观要求的同时确保其卓越性能。设计确定后可通过增材制造快速制造和交付定制化的产品。

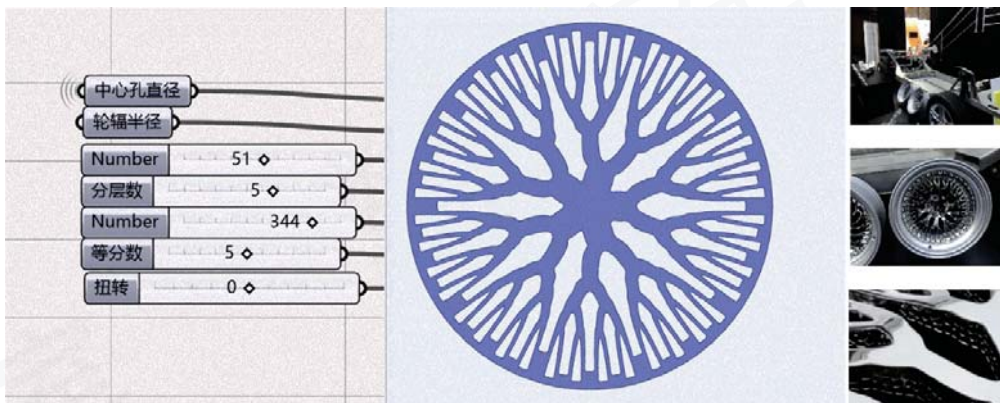


图 34 创成式设计汽车轮毂、面向设计规则的自动设计

而设计师也可以在设计过程中，通过与客户互动，通过VR技术进行外观研讨，基于产品的数字孪生体进行性能仿真和互动操作。应用增材制造技术，可快速、低成本地制造产品原型。

随着增材制造设备的普及，未来的制造工厂可能就在于家庭或社区，就像印刷品的制作已经从印刷厂到社区打字复印店，乃至通过多功能打印机随时打印。目前以FDM工艺为主的桌面3D打印机已开始进入家庭。随着金属和增减材混合3D打印机的普及，未来将可以在线参与设计并购买下载数模，居家直接打印制造。或者类似现在数码冲印的方式，在线下单实物直接快递到家，这已成为现实。

2. 供应链和物流

产业向智能化和服务化转型使供应链体系向协同化转变，由原来相对稳定的

供应链体系转变为一种更大范围、更灵活、更多向、更社会化的协同体系。在此过程中存在很多不可避免的不确定因素。供应链流程过长，特别是遇到问题需要调整时，往往会造成决策不及时而错失商机，或者造成巨大库存积压和资金链问题。

同时，不断扩展的数字智能技术，使得供应链中信息流、物流、资金流产生了海量数据，传统方法也难以对这些数据进行有效处理和利用。

为建立一个连续、快速、可持续微调的供应链网络，需要建立供应链和物流的数字孪生体。基于模型评估每个独特客户的供应链流程执行情况，提出物理资源和人力资源的最佳利用方案。通过流程镜像实时提供所有供应链相关的业务信息，提高端到端的可视性和透明度，支持自动决策，提高物流效率和降低成本。

其中仿真是关键技术之一。可对整个复杂供应链与物流系统进行仿真，并实时接收供应链节点数据，实时预测、决策和反馈调整。

将数字孪生体应用于供应链网络优化，将带来以下方面的优势：

- 实时在线的敏捷性：基于采集的供应链实时运行数据可提高供应链决策速度，在其面对不断变化的环境和难以预见的情况时，能够快速响应；
- 通信与协作：供应链物流组织与其供应商、合作伙伴和客户之间可以实现实时通信与协作，根据可靠、一致的最新数据做出决策；
- 点到点的可视化：随时查看整个供应链，实现对其关键绩效的可视化管理、跟踪流程、掌握进度以及平衡供需；
- 智能优化：通过模拟规划和预测结果相结合，优化决策；
- 整体决策：建立对供应链的全球运营视图，企业可以实施整体决策。

例如，世界上最大的轴承制造商 SKF 在其分销网络中构建了一个数字孪生体，包括 800 多个 SKU 的主要数据，涵盖五个不同系统的 40 个安装单元。数字孪生体技术使该公司的区域化模型转变为全球综合规划模型。根据数字孪生体技术提供的数据可视性和完整性，供应链规划人员能够从本地运营转变为全球化决策（图 35）。

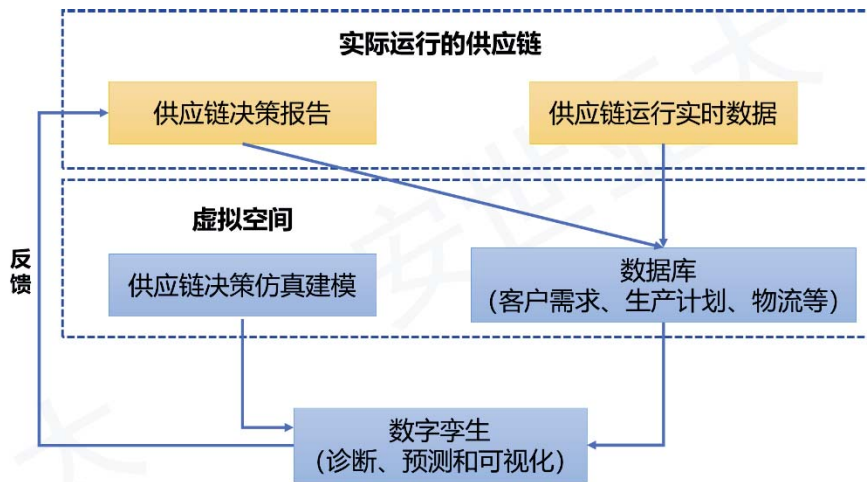


图 35 供应链数字孪生体各要素的关系（来源：SKF）

确保供应链有效的基本要素是可控的物流系统。DHL 公司 2019 年趋势报告显示，数字孪生体技术将在物流领域创造价值，虽然尚未在物流领域得到广泛应用，但许多关键支持技术已经到位。物流部门已经利用传感器跟踪货物，还应用机器学习和高级分析技术来优化供应链，并从历史装运和运营数据中获得新的见解。

DHL 的物流专业人员甚至正在为仓库提货和车辆装载等任务实施增强现实、混合现实和虚拟现实应用，这些任务的数据非常适合在这些环境中创建其数字孪生体。数字孪生体在供应链和物流行业应用的具体实例可以包括（图 36）：

- 包装和容器数字孪生体，如集装箱；
- 货运数字孪生体，如带有监控温度、包装方向、冲击和振动传感器运输工具，对敏感、高价值货物随时监控或模拟货运过程；
- 仓库和配送中心数字孪生体。可将设施本身的 3D 模型与相连的仓库平台中收集的物联网数据，以及库存和运营数据（包括单件货物的大小、数量、位置和需求特征）结合起来，允许公司优化空间利用并模拟货物、人员和物料搬运设备的移动；
- 物流基础设施数字孪生体。仓库和配送中心仅占有物流基础设施的一小部分。货物从来源地流向目的地取决于多个要素的协调，包括船舶、卡车和飞机、订单和信息系统等，其中最重要的是人员。这种复杂的多利益相关环境在主要的全球物流中心最为明显，如货运机场和集装箱港口。在这些设施中，信息交换系统的不完善加剧了高效运行的挑战；
- 全球物流网络数字孪生体。在物流领域，最终的数字孪生体将是整个网

络，不仅包括上述物流资产，还应包括海洋、铁路、高速公路、街道以及客户住宅和工作场所等。



图 36 供应链和物流中的数字孪生体（来源：DHL）

数字孪生体在供应链和物流领域应用的价值包括：

- 更快的入库及制造。如：数字孪生体将使更多的产品能够被配置和定制，以满足单个客户的特定需求；谨慎选择供应商地点，采纳运输和货运管理的新方法；促进与供应商更紧密的合作。通过数字孪生体，制造商可提前共享需求，也可以了解供应商生产能力；
- 优化厂内物流：公司可根据生产线看板调整其交付流程，以适应更短的交付周期和更高的产品复杂性。例如，工厂需要更加严格地处理材料和零部件相关数据，以确保产品的数字孪生体与正确的批次代码相关联（追溯）。或者为了满足定制化小批量和单件生产的要求，调整材料存储和处理系统，以应对更复杂和多变的材料需求；
- 优化售后物流：借助数字孪生体，原始设备制造商或第三方服务合作伙伴可以在世界任何地方监控产品运行，并向客户提供一系列增值服务，从远程支持到预测性维护。然而，这些新型服务将高度依赖供应商售后供应链的有效性，备件的供应和分配将成为许多公司运营模式中日益重要的因素。为了建立和运营高性能的售后物流和支持能力，公司需要不

断审查备件库存的定位和分配,以保证交付周期符合他们对客户的承诺。还需要将零件分销与其售后市场和现场服务运营的其他要素紧密联系起来。例如,他们可能需要将备件交付与服务技术人员到达客户现场相匹配,或者更多地利用他们的经销商和分销商网络来提供售后服务。售后供应链还需要在产品的使用寿命结束时对其进行管理。数字孪生体可以帮助公司最大化退役产品的潜在价值,帮助他们识别设备的确切类型和内容。获取这一价值需要更复杂的逆向物流流程,并与适当的再制造、回收和废物管理系统相集成。

- 协调供应链:找到更明智的方法来平衡网络中的库存成本、可用性和交付周期。数字孪生体将增加整个供应链的可视化,以便了解实物位置、自己的库存以及供应商、销售渠道和分销合作伙伴的库存。建立最佳供应链渠道,优化供应商和制造路线、物流通道和库存地点的配置,以支持高服务水平,确保公司能够满足他们对客户做出的可用性和响应时间承诺。同时,数字孪生体使供应链富有弹性,有能力维持意外中断时的服务级别,从重大事件中快速恢复,以及有效应对需求变化。

增材制造技术对供应链和物流的优化,具体表现在以下三个方面:一是“按需制造”,根据订单按产品数模进行生产,将有助于减少实体库存和资金积压;二是“就近制造”,选择物流网络上最快速和便宜的地点,满足交付时间和成本的要求;三是“万变不离其宗”,简化了原材料的种类和物流,如对各种不锈钢制品零件,实际只需确保不锈钢粉末库存,而不是保留各种成品库存。

因此增材制造将为供应链和物流带来极大变革。例如 UPS 和 Fast Radius、SAP 合建的分布式制造平台,旨在满足全球供应链不断变化的需求,提供按需制造和供应链解决方案。其核心是提供一个“虚拟库存”,可以安全地存储客户零件的数据模型和生产工艺,零部件仅在需要时才进行生产。这消除了制造商物理存储零件的库存成本。并能够在 24 小时内立即补充库存。因此,制造商将能够拥有更多的流动资金去进行研发生产,以提供更快的生产速度和更高的定制水平。

通过将按需灵活制造的定制化生产与 UPS 的全球供应链解决方案集成在一起,可协助制造商实现基于云的供应链管理,有效降低其供应链运营成本。具体的应用形式是:

- 1) UPS 通过特许经营的方式,在全美 62 家 UPS 连锁门店开设 3D 打印服

务，客户首先把数模设计上传给专业的 3D 打印公司 First Radius 进行 3D 打印设计（备件数模则只需从虚拟数字仓库中提取），然后该部件将会在距离交付目的地最近的 UPS 门店进行打印；

2) Fast Radius 将增材制造中心设置在美国肯塔基州路易斯维尔的 UPS WorldPort 工厂内，这种战略性的“跑道尽头”位置使 Fast Radius 最多可以节约 6 个小时的生产时间，这可以为客户提供真正的准时生产；

3) UPS 表示，订单最快可能在下单的同一天内发货；

UPS 还成立了一个先进的方案解决团队以创建按需 3D 打印示范中心，制定供应链解决方案，并进一步将 3D 打印技术广泛应用于客户群。

3. 产品使用和维保

数字孪生体技术在产品使用和维保领域的应用主要集中在高价值、高风险的复杂装备，这也是数字孪生体技术的应用起源。

美国国防部最早提出将数字孪生体技术用于航空航天飞机的健康维护与保障。首先在数字空间建立真实飞机的模型，并通过传感器实现与飞机真实状态完全同步。这样每次飞行后，根据结构现实情况和过往载荷，及时分析评估是否需要维修，能否承受下次任务的载荷等。

美国空军在 2013 年发布的《全球地平线》顶层科技规划文件中，将数字孪生体视为“改变游戏规则”的颠覆性机遇，并从 2014 财年起组织洛马、波音、诺格、GE、普惠等公司开展了一系列应用研究项目，并陆续取得成果。美国《航空周刊》预测，“到 2035 年，当航空公司接收一架飞机的时候，将同时验收另外一套数字模型，它就像飞机的一个忠诚影子，伴随一生，从不消失”。

复杂装备应用的民用领域，同时还是一个能够提供长期服务和持续收入的高端产业。在航空发动机、涡轮燃气轮机、风力电场等领域，装备停机都将造成极大的经济损失，非预测性故障甚至造成严重安全事故。应用数字孪生体进行设备监控、故障预测和预测性维护，已经成为产业普遍需求和厂商持续盈利的“金牛”业务（波士顿矩阵）。

以航空发动机为例，其维修保养行业具有以下特点：

- 行业进入的资本要求和行业技术壁垒要求高。MRO 企业需要大量的资金投入，其中包括建设维修厂房、培训维修人员、订购航材和购置专用工

具设备等。国内较大的飞机维修企业，投资额都已超过上千万美元，至于世界级的飞机维修企业，其投资更是高达上亿或几十亿美元；

- 为争取客户，维修企业必须取得多个国家适航部门的维修许可，同时也要接受适航部门和客户的双重审核。这些审核除了针对设备、人员资质、生产程序等以外，还包括对零件的可追溯性要求：诸如从哪里拆、检查结果、修理过程、经过如何的改装、该发动机又装回了什么零件等等；
- 同时维修流程及要求复杂。航空发动机的构型复杂，每一种机型在原始生产厂家（OEM）开始生产后，都要符合最新发布为数众多的适航指令（AD）、服务通告（SB）等改装要求，这些要求包括零部件的检查、处理甚至替换。维修企业必须有充分的手段跟踪和控制这些改装；
- 维修费用昂贵。发动机零件数量庞大，售价高昂，维修费用也居高不下。以 IAE 公司 V2500 为例，一台发动机的大修费用最高可以达到 500~600 万美元。因此如何替客户省钱直接影响维修企业的竞争力；
- 维修时间要求严格。发动机是航空公司的珍稀资源，后者对前者在维修企业的维修时间（TAT）有严格要求。对 TAT 的严格控制也是维修企业竞争力的重要因素。

目前，全球每年飞机维修费用大致为 310 亿美元，而其中 60% 用于发动机的维修上。为了抢占这部分利润空间，发动机制造厂家正逐步将其业务延伸到发动机性能监控和维护维修领域。从提供“发动机”到提供“发动机+服务”甚至只提供“服务”，已经成为发动机制造厂商延长价值链、提高竞争力的重要手段和发展趋势。

全球三大航空发动机制造厂家 PW、RR 和 GE 都纷纷改变原有单一出售发动机的经营模式，致力于扩展发动机维护、租赁、数据管理分析等服务，通过服务合同绑定用户，扩大利润空间。

航空发动机 MRO 的复杂性、高风险和高价值促进了数字孪生体的应用。以装备数字孪生体模型为核心，一方面，基于环境数据、任务数据、维修保障，对装备进行故障预测，支持装备的任务规划；另一方面，通过装备与其数字孪生体之间的数据及信息交互，使装备数字孪生体得到不断修正，逐步提升模型的精确性，实现定制化的维修和保障。结合 VR 等智能技术，数字孪生体还将进一步提升现场实时维护能力。

数字孪生体将促进装备维护实现从“事后评价”向“事前预测”的转变：

- 装备可靠性影响关键因素分析：基于装备使用过程中产生的大量数据，分析不同装备、地理环境、使用强度、维修保障方式等因素对装备可靠性的影响，获取共性的关键影响要素，为开展航空装备故障预测奠定基础；
- 装备故障预测：基于影响装备可靠性的关键因素，采取基于数据驱动的机器学习方法，建立装备故障预测模型。采用一段时期内的装备实际使用数据对预测模型进行训练，达到要求的预测精度，从而实现装备的故障预测；
- 实现装备的定制化维修：通过信息交互机制，实现传感器数据、使用数据等真实状态数据的完全同步。在每次运行后，根据结构现有情况和历史载荷，及时分析评估是否需要维修，能否承受下次特定任务的载荷等。产品的历史数据对操作、维修和工程人员开放，针对每个产品定制预先维修或翻新方案。维修将基于对损伤和损伤先兆的早期分析识别，大部分保障工作将转变为寿命周期中的损伤预测、预防和管理。

对于复杂装备的维护保养模式，也逐步应用到民用产品上。例如构建汽车的数字孪生体，记录保养和行驶过程中的数据，为其维护保养提供支持，已经成为领先的汽车品牌厂商在产品设计和获得维保服务收入的重要来源。对于无人驾驶的智能汽车，构建其数字孪生体更能进一步加强与道路、网络、停车、加油充电、维保网点等周边环境的互动。

例如特斯拉公司为其生产和销售的每一辆电动汽车都建立了数字孪生体，相对应的模型数据都保存在公司数据库。每辆电动车每天传输其日常数据，并通过数字孪生体的模拟程序使用这些数据来发现可能的异常情况并提供纠正措施。每辆车都在反馈数据，特斯拉每天可获得相当于 160 万英里的驾驶体验，并在不断的学习过程中反馈给每辆车。

对于日益增多的智能化消费产品，虽然维护保养要求不高，但其作为物联网的数据采集终端，在使用阶段也将产生大量数据，价值不容忽视。例如以智能手表、智能眼镜、智能运动鞋等为代表的可穿戴产品，一方面作为消费者数字孪生体如影随行的数据采集终端，另一方面产品智能化和可控程度不断提高，如 4D 打印随形变化的运动鞋、可变度数眼镜等也将不断出现。

增材制造技术为可预测性维护提供了产品制造过程中更多的参数数据,使得模型更为全面,预测更为准确。同时按需打印大大降低了备件库存,对于部分高价值和难以拆卸的装备和场合(例如战场和太空环境,图 37),应用增材制造技术还可进行现场打印和修复,大大降低修复时间和成本。



图 37 太空 3D 打印(来源:MADE IN SPACE)

(六) 数字孪生产业的典型应用案例

航空发动机已经成为人类有史以来最复杂最精密的工业产品,每台零件数量达万件以上。航空发动机虽然只是飞行器的一个分系统,但其所涉及的学科和技术领域几乎与整个飞行器相同,在许多技术上的要求甚至更高,可以说是集成了各个技术领域的尖端技术,是典型的知识、技术密集的高科技产品。其研制工作被称作是在挑战工程科学技术的极限,被称为“工业王冠上的明珠”。

航空发动机的安全可靠、燃油经济性和全生命期成本是市场竞争的关键。作为全球三大航空发动机生产商之一,美国 GE 公司为了提高其核心竞争力和加强市场主导地位,在其航空发动机全生命期过程引入了增材制造和数字孪生体等先进技术,成功实现了企业的数字化转型应用。

增材制造技术在航空发动机领域的广泛应用,是促使 GE 向一家数字化工业公司演变的关键之一。增材制造技术使得 GE 航空发动机的优势首先体现在零部件的轻量化方面,其次是通过产品设计优化和免组装的整体式制造来提升航

空发动机零部件的性能。例如，Catalyst 涡桨发动机将 855 个零件通过增材制造技术组合成 12 个零件，减重 5%；与同级别的发动机相比，Catalyst 涡桨发动机的燃油消耗降低 20%，巡航功率增加 10%，大修间隔为 4,000 小时，比竞争对手多出 33%。增材制造带来的第三个优势是，整体设计一体打印成形，使得零部件数量大幅度减少，进而大幅度简化研发组织、供应链管理和维保服务。以 CT7 涡轴/涡桨发动机改进型的燃烧室中框架单元体为例（图 38、图 39），采用增材制造一体化工艺后，原来的七个组件及其 300 个零件最终组合成一个零组件。除了减重十余磅，研发团队规模减少了一个数量级，供应商数量由 50 多降为一个，技术服务中心由五个降为一个。整体化设计同时减少了装配过程，提高了性能和可靠性。减重则意味着全寿命周期使用成本的降低，数据系统的减少也减轻了 IT 系统的难度和负荷。这些特性使 GE 航空发动机产业数字孪生体的叠加效应放大许多倍。

Supply Chain Disruption



图 38 增材制造对航空发动机轻量化和减少零件数量的贡献(来源: GE Aviation)

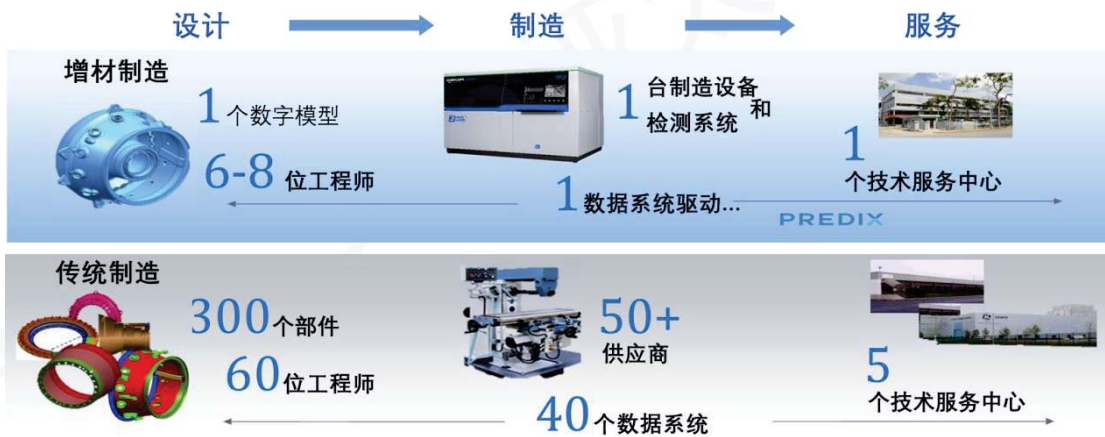


图 39 增材制造对研发组织、供应商管理、维保服务的简化(来源: GE Aviation)

为了驱动自身、客户以及整个工业世界的数字化应用水平更上一个新台阶，GE 公司基于工业互联网应用，率先提出了数字孪生体概念。2016 年，GE 宣布与 ANSYS 合作，共同打造基于模型的数字孪生体技术。通过此次合作，GE 的数字部门、全球研究部门和产业部门与 ANSYS 一起，携手扩展并整合 ANSYS 行业领先的工程仿真、嵌入式软件研发平台与 GE 的 Predix 平台，从而在多种不同产业领域发挥数字孪生体解决方案的作用。将数字孪生体解决方案从边缘扩展到云端，不仅可加速实现 ANSYS 仿真价值，推动 Predix 平台的应用，而且还能为探索突破性商业模型和商业关系创造新的机遇（图 40）。



图 40 ANSYS 和 GE 开展预测性维护应用（来源：ANSYS）

GE 与 ANSYS 的合作表明，仿真技术不再仅仅只是作为工程师设计更出色产品和降低物理测试成本的利器。通过打造数字孪生体，仿真技术的应用将扩展到各个运营领域，甚至涵盖产品的健康管理、远程诊断、智能维护、共享服务等应用。例如，通过日益智能化的工业设备所提供的丰富传感器数据与仿真技术强大的预测性功能双剑合璧，帮助企业分析特定的工作条件并预测故障点，从而在生产和运维方面节约成本。大部分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。GE 通过执行快速的“假设”分析，用户可在研发过程早期了解产品特性，避免在不切实际的设计上浪费时间，并且防止在验证阶段对设计返工。借助数字孪生体技术，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。

运用数字孪生体技术，能够利用结构、热学、电磁、流体和控制等仿真软件进行单场研究、多场耦合研究，从而实现产品的设计优化、确认和验证，以满足相关的需求。同时，可以构建精确的综合仿真模型来了解实际的产品性能，并持

续创新，这些功能是传统方法无法企及的。

GE 认为，从概念设计阶段开始建立航空发动机数字孪生体的过程更容易地将设计和结构模型与运行数据相关联。反过来，发动机数字孪生体还能有助于优化设计，提高生产效率。目前，GE 的数字孪生体技术正在向这方面发展，它通过汇总设计、制造、运行、完整飞行周期和其他方面的数据，以及在物理层面对发动机的了解，预测航空发动机的性能表现：

- 将航空发动机实时传感器数据与性能模型结合，随运行环境变化和物理发动机性能的衰减，构建出自适应模型，可精准监测航空发动机的部件和整机性能；
- 将航空发动机历史维修数据中的故障模式注入三维物理模型和性能模型，构建出故障模型，可应用于故障诊断和预测；
- 将航空公司历史飞行数据与性能模型结合并融合数据驱动的方法，构建出性能预测模型，预测整机性能和剩余寿命；
- 将局部线性化模型与飞机运行状态环境模型融合并构建控制优化模型，可实现航空发动机控制性能寻优，使发动机在飞行过程中发挥更好的性能。

这些模型联合刻画出一个具有多种行为特征的数字发动机，并向物理空间传递在特定场景下所呈现的行为信息，GE 实现对航空发动机运维过程的精准监测、故障诊断、性能预测和控制优化。

基于航空发动机运维过程的数字孪生体应用，GE 还正式发布了预测性维修和维护产品——TrueChoice，帮助客户优化全生命期内的拥有成本。

七、数字孪生城市

(一) 现状

城市作为国计民生的重要载体，必将是数字孪生体技术最重要的服务领域之一。目前，数字孪生体已经从制造领域逐步延伸拓展至城市空间，深刻影响着城市规划、建设与发展。

数字孪生城市是在城市累积数据从量变到质变，在感知建模、人工智能等信息技术取得重大突破的背景下，建设新型智慧城市的一条新兴技术路径，是城市智能化、运营可持续化的先进模式，也是一个吸引高端智力资源共同参与，从局部应用到全局优化，持续迭代更新的城市级创新平台。

数字孪生城市是数字孪生体技术在城市层面的广泛应用，是基于数据驱动、虚实交互、先知先觉和共生共智的城市信息模型（CIM），使数字城市与现实城市同步规划、同步建设，实现全过程、全要素数字化，做到城市全状态实时化、可视化，以及城市管理决策与服务的协同化和智能化。

同时，数字孪生城市也是城市信息化建设不断发展的产物，是城市信息化发展的高阶阶段。形成的与物理城市相对应的数字孪生城市，充分利用前期形成的城市全域大数据，为城市综合决策、智能管理、全局优化等提供平台、工具与手段（图 41）。



图 41 城市信息化建设应用及发展变化（来源：安世亚太与中机创）

中国开展数字孪生城市建设是有一定基础的。目前已有 600 多个城市开展了智慧城市建设，拥有空、天、地一体化的基础网络部署，在政务资源管理、“互

联网+政务”服务等方面也有很多应用。

目前，数字孪生城市的发展还处于初步阶段。下一步可优先提升城市规划、建筑、交通、能源等领域的数字化水平，构建统一的城市信息模型，分步务实推进，实现数字城市和现实城市“虚实结合”的同步建设，最终实现“虚实互动”的数字孪生城市运行模式。

（二）综述

要建成新型智慧城市，首先要构建城市的数字孪生体。城市级的整体数字化是城市级智慧化的前提条件。数字孪生城市的发展与应用内涵，真正体现了新型智慧城市想要达到的愿景和目标。它是城市实现智慧管理的重要设施和基础能力，是技术驱动下城市信息化从量变走向质变的里程碑。

数字孪生城市的建设，一方面已经具备了基本的技术基础，另一方面也存在着巨大的难度和挑战，但同时多要素融合将引发颠覆式创新：

- 信息通信(ICT)技术的发展，已经基本具备了构建数字孪生城市的能力，如全域立体感知、数字化标识、万物在线、可信互连、泛在计算、智能定义一切、数据驱动决策等，构成了数字孪生城市强大的技术基础，大数据、区块链、人工智能、智能硬件、AR/VR等新技术应用，使模拟/仿真/分析城市中发生的问题成为可能。IT、DT技术不断完善，产品功能不断拓展增强，为构建数字孪生城市奠定了坚实的技术基础；
- 虽然技术条件基本成熟，但实现方案相当复杂。这不仅是新技术融合创新的试验场，也是人类智慧达到新高度的新挑战。数字孪生城市的构建，将引发城市智能化管理和服务的颠覆性创新。

数字孪生体在城市建设与发展中的核心价值在于，它能够在现实世界和数字世界之间全面建立实时联系，进而对城市物理实体全生命期的变化进行数字化、模型化和可视化。数字孪生城市具有传感监控即时性、城市信息集成性、信息传递交互性、发展决策科学性、控制管理智能性、城市服务便捷性等特征。通过数字孪生城市的建设，在数字空间再造一个城市，作为现实城市的映射和镜像。通过大规模仿真、推演、预测，定位分析未来城市运行中可能遇到的瓶颈问题与社会风险，以及与其他数字孪生城市进行“共智”，更好地实现传统智慧城市建设向数字孪生城市的过渡，进一步提高城市建设的智慧化程度，以及促进城市群之

间的互动协作。

(三) 数字孪生城市参考架构

1. 参考架构

数字孪生城市是与物理城市一一映射、协同交互、智能互动的虚拟城市，先对城市系统解耦、然后进行系统性和模型化的重构。

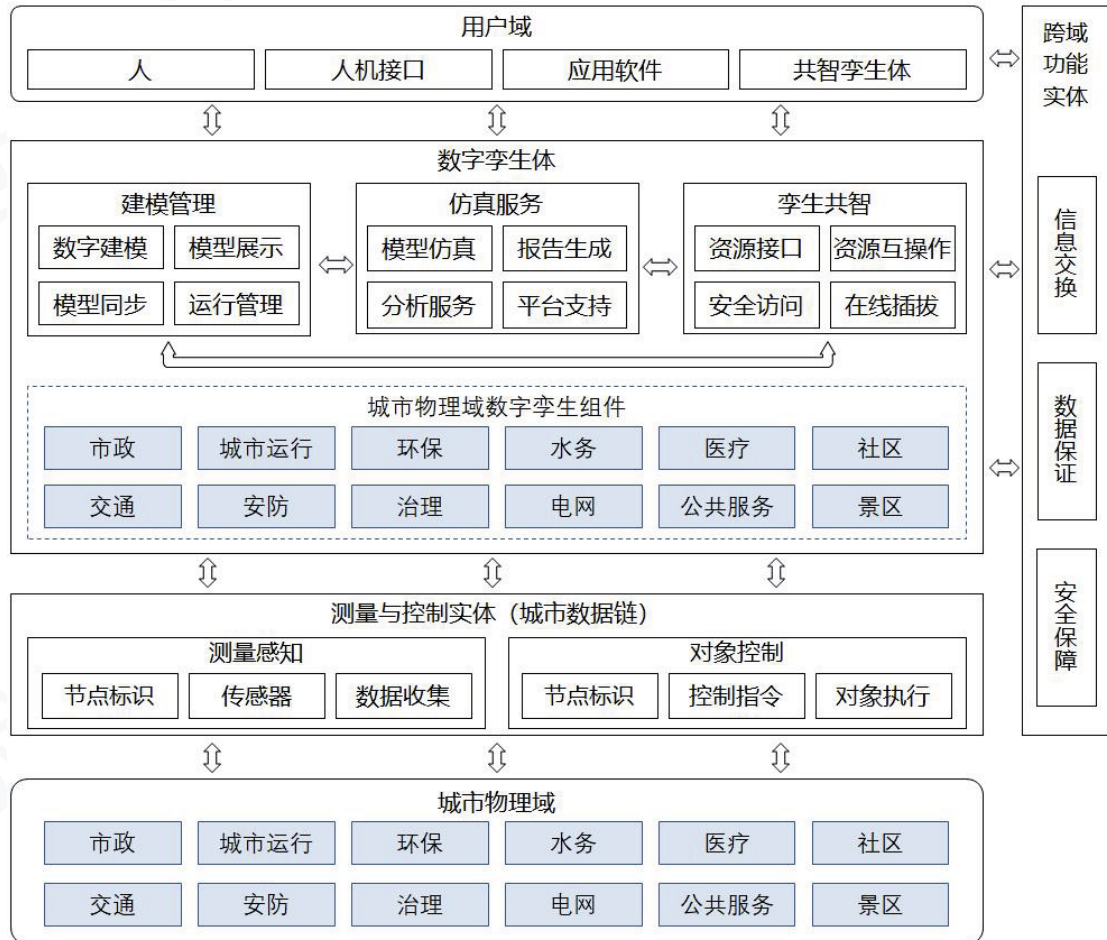


图 42 数字孪生城市系统的参考架构

基于数字孪生系统的通用参考架构，依据城市特色，数字孪生城市对城市物理域及其数字孪生组件进行了实例化（图 42）：

1) 城市物理域

主要是指包含市政、交通、城市运行、安防、环保、治理、水务、电网、医疗、公共服务、社区、景区等城市和民生各环节的各种物理实体对象以及相关的政务和业务活动。

2) 数字孪生体

数字孪生体包括与城市物理域实体一一对应的数字孪生组件和数字孪生体管理支撑功能两大部分。

2. 数字孪生城市的成熟度特征

按照统一的数字孪生体成熟度模型,数字孪生城市在各成熟等级上的标志和特征如下:

1) 数化

- 构建了城市三维信息模型(CIM),其中包含建筑信息、地理信息、新型街景、实景三维等方面的要素,并加以应用;
- 城市中的建筑物,构建了建筑信息模型(BIM),是CIM的重要组成部分和基础。包括建筑控制、消防管道、结构单元、结构分析、供热通风、电气、结构、施工管理等众多领域,用于建筑物运行维护以及相关市政工程规划;
- 对城市地理信息进行三维建模(3D-GIS),是CIM的重要组成部分和基础。对城市的真实地形、地上地下景观进行数字化三维模拟,给用户提供一个与真实城市一致的虚拟城市环境,并支持三维浏览、三维空间分析、信息检索、辅助设计等应用;
- 以CIM为基础,结合专业领域应用,构建面向民生的各种应用模型,例如:发挥城市交通系统最佳运力效果的智慧交通模型、促进水网和电网可靠高效运行的智能市政设施管理模型等等;
- 在数据采集中,应用先进技术(如激光三维扫描、倾斜遥感摄影、激光点云三维建模等)提高数据采集的效率和精确度。

2) 互动

- 通过物联网技术,依据城市市政、交通、社区、安防等领域需求,安装布置充足的传感器和摄像头等数据采集设备,进行动态、准确的数据采集;
- 应用“部件”和“事件”对于数据源进行管理。对于城市市政基础“部件”(例如井盖、电线杆等)进行编码,依据国标属性建库、及时普查和更新,确保有效性,能够快速查询追踪;同时对于“事件”(例如井盖被盗、市政施工等)进行采集和跟踪,确保处理闭环和可追溯性;

- 确保“部件”传感器和“事件”信息等从城市物理空间到城市数字孪生体的有效传输。城市数字孪生体能够动态反映物理空间真实现状，如水电管网的即时运行信息、城市交通的拥堵情况、环保排放的污染物测量数据、景区实时客流人数等，物理实体和数字孪生体同步更新；
- 依据城市数字孪生体做出的决策指令，能够反作用于城市物理空间，例如交通拥堵的疏导指令能够及时传递到城市交通指挥系统、污染减排控制措施能够及时传递到交通限行、厂矿限产、医疗预备等现实领域。

3) 先知

- 根据物理模型和仿真预测未来，并且随着实体数据的搜集，依据同步速率进行收敛；
- 依据城市运行数字孪生体：根据重大节假日运输能力和人流量情况等历史数据，推演预测下一次的人流情况，以及形成火车站和汽车站等需要进行运输能力优化调整的计划；
- 城市景区数字孪生体：能够根据节假日各车站人流情况、景区周边酒店预订数据、景区历史客流情况等数据推演出未来景区游客流量、景区配套服务能力调整计划以及景区设施的维护检修计划等；
- 依据城市应急救援数字孪生体：资源与演习数据能反应到其数字孪生体上，预测应急救援时所面对的实际情况；
- 市政数字孪生体能够根据当前地下给排水管网设施数据、城市历史水涝数据和历史气象数据推演出未来可能发生的城市水涝强度及地下管网规划优化方案；
- 依据交通数字孪生体：能够根据城市车辆注册数、道路车流量和交通事故发生次数等数据推演出各道路通行能力及交通信号灯设置需求。

4) 先觉

- 城市数字孪生体综合分析天气条件、环境污染、人群流动等因素影响，推演流行病发展趋势，提前采取预防和医疗保障措施；
- 对环境污染等影响因素，例如天气气象条件、交通车辆尾气排放、工厂废气排放等。城市数字孪生体根据其历史数据，依据人工智能算法找到相关关系，可采取针对性的预防措施，降低经济损失和减少停产停课等对生产生活的干扰；

- 城市数字孪生体根据网络舆情、敏感人员聚集，推演社会治安和群体事件风险隐患，采取预防性措施；
- 城市数字孪生体根据景区客流量历史数据、道路交通承载力、宾馆客房预定率等数据，推演节假日客流量趋势。采用网络门票预订和经济杠杆等措施，调控客流，在游客体验和商业利益中找到最佳平衡点；
- 城市数字孪生体综合分析各城市管理要素与城市发展目标之间的关系，合理匹配，模拟规划，满足 GDP 增长和“宜居城市”建设等多目标优化。

5) 共智

- 城市数字孪生体能够促进各现实城市之间基于各自的自然资源、产业特征、经济体量等不同和互补，构建城市经济共智圈，如长三角、珠三角、粤港澳大湾区等，实现城市群可持续生态化的发展；
- 通过城市交通数字孪生体之间的协同，实现城市群之间交通网络的整合和整体规划，真正把城市群融为一体；
- 通过城市市政数字孪生体之间的协同，实现城市群之间水、电网络的整合和整体规划，不同城市间实现能源的最佳利用效率，以及灾害备份；
- 通过城市安防数字孪生体之间的协同，促进追逃人员的警务合作，以及人口拐卖、走失人员的快速定位和查找；
- 通过城市间环保数字孪生体之间的协同，采取一体化的分析和预防措施，有效协调解决跨界的空气污染、河流污染等问题；
- 通过城市景区数字孪生体之间的协同，帮助游客合理安排跨城旅游路线，多种旅游资源的互补整合，促进节假日客流量的有序引导和分散，以及游客旅游体验的提升。

(四) 数字孪生城市的关键技术

数字孪生城市作为面向新型智慧城市的一套复杂技术和应用体系，多门类技术集成、多源数据整合和各类应用平台功能的打通是建设成功的关键要素。数字孪生城市除了数字孪生体的通用关键技术外，还有其独特的关键技术领域，简要介绍如下：

1. 新型测绘

测绘技术的发展经历了模拟测绘、数字化测绘和信息化测绘发展阶段。随着

物联网、大数据、移动互联网等空间技术和信息通信技术的不断进步,测绘技术也逐渐由靠人工进行内、外业采集的传统测绘,发展到今天的使用卫星导航定位、无人机、物联网、大数据等先进技术手段的智能化测绘。

数字孪生城市的构建需要新型智能测绘技术的强力支撑,在城市时空大数据管理、地理监测、高精度实体测绘等方面提出快速测绘和精准采集的高要求,基于实景三维的新型智能测绘技术构建的 CIM 是数字孪生城市运行的主要载体。实景三维测绘是利用倾斜摄影、全景拍摄和激光雷达(LiDAR)等技术,通过多视角图像匹配、多数据融合来真实展示现实三维世界的新技术。其中倾斜摄影测量因其数据获取容易、建模快速、纹理真实,已成为实景三维构建最常用的方式。

基于“城市实景三维”动态可视化的实现,其核心技术构成包括:高精密度测量及数采设备、领先且主流的测绘方法、快速激光三维建模技术和高效数据处理技术等:

- 高精密度测量及数采装备:包括多视角航摄仪系统、适合直升机和无人机平台的测绘级航摄仪、全谱段多模态成像光谱仪、高光谱遥感系统、机载双频激光雷达设备等;
- 领先且主流的测绘方法:目前主要是倾斜摄影技术和三维激光扫描技术。倾斜摄影技术突破了以往三维建模正射影像只能从垂直角度拍摄的局限,通过在同一飞行平台上搭载多台传感器,同时从一个垂直、4个倾斜等5个不同的角度采集影像,同时辅助带坐标姿态信息的室外影像和 LiDAR 数据获取,改变不具备空间信息的传统影像拍摄的现状,并实现与倾斜摄影影像等多源数据的融合。三维激光扫描技术可大面积高分辨率获取被测物体表面的三维坐标、反射率和纹理等密集点云数据,快速复建出被测物体的三维模型及线、面、体等各种图件数据;
- 快速三维激光建模技术:主要指依托倾斜摄影测量遥感数据成果,结合摄影测量学、计算机图形学算法,通过自动化处理流程手段,获取三维点云、三维模型、真正射影像(TDOM)、数字表面模型(DSM)等测绘成果的模式构建技术,如激光三维点云建模技术;
- 高效数据处理技术:指利用机器学习或深度学习算法以及 SLAM 算法对测绘地理大数据进行自动识别、数据挖掘和三维重建,快速提取地物特征、发现隐藏在大数据中的知识和还原地物模型,结合充实各地理实体

的社会经济属性,形成多源异构且多时态空间数据的多源数据融合技术。利用移动互联网和智能手机终端采集的大量实时动态非标地理信息数据和专业的测绘地理信息数据进行匹配,提高地图生产效率的移动互联网及动态众包数据更新技术。

基于新型测绘技术,可一次性获取大面积的城市建筑物及地形模型,大大降低了测绘工作经济成本和时间代价,支持城市数字孪生体模型的高精度和快速构建。基于新型测绘技术获取的城市实景三维数据是数字孪生城市空间地理框架建设的基础数据,更是数字孪生城市时空信息模型空间基础设施建设的重要内容。利用这种可量测、真实、实体化管理的三维数据构建的城市信息模型,在数字孪生城市管理、规划、地质灾害、安全保障、城市形象展示等方面发挥至关重要的作用,为政府基于数据的治理决策提供技术支撑,为公众提供数字智能化服务。例如利用城市实景三维数据,在城市公共安全与应急反恐等方面,可使指挥决策者看到比正射影像更多的环境信息,可看到事发地建筑物侧面的紧急出口,可以进行准确量算,比如计算通视距离、设计制高点 and 狙击方案等。这些事发地周围的详细信息,在城市安防应急行动中关乎人员及财产的安全,有时甚至能起到决定性的作用。

2. BIM

BIM 的全称是建筑信息模型 (Building Information Modeling),它包含了不同专业的所有信息、功能要求和性能,把一个建筑工程项目的信息,包括设计过程、施工过程、运营管理过程的信息全部整合到一个模型里。

BIM 是对包括工程建设行业在内的多个行业的工作流程、工作方法的一次重大思索和变革。美国佐治亚技术学院建筑与计算机专业的 Chuck Eastman 博士 1975 年提出了 BIM 的概念。在 20 世纪 70 年代末至 80 年代初,英国也在进行类似 BIM 的研究与开发工作。当时,欧洲习惯把它称之为“产品信息模型 (Product Information Model)”,而美国通常称之为“建筑产品信息模型 (Building Product Model)”。1986 年 Robert Aish 发表的一篇论文中,第一次使用“Building Information Modeling”一词。他在这篇论文中描述了今天我们所知的 BIM 论点和实施的相关技术,并在该论文中应用 RUCAPS 建筑模型系统分析了一个案例来表达他的概念。21 世纪前的 BIM 研究由于受到计算机硬件与软件水平的限制,仅能作为学术研

究的对象，很难在工程实际应用中发挥作用。21 世纪后，随着计算机软硬件水平的迅速发展以及对建筑生命周期的深入理解，推动了 BIM 技术应用的不断前进。

BIM 技术是以三维数字化为载体，关联整合了城市建筑物设计、施工建造、运营到拆除等全生命周期各阶段空间及语义信息，并同时在各阶段得到应用，在提高设计和建设质量、降低建设成本、提高生产效率等方面有重要作用。

基于美国国家 BIM 标准（NBIMS）对 BIM 技术的定义，定义由三部分组成：

- 1) BIM 是一个设施（建设项目）物理和功能特性的数字化表达；
- 2) BIM 是一个共享的知识资源，是一个分享有关这个设施的信息，为该设施从建设到拆除的全生命期中的所有决策提供可靠依据的流程；
- 3) 在项目的不同阶段，不同利益相关方通过在 BIM 中输入、提取、更新和修改信息，可以支持各相关方的协同作业。

BIM 建筑信息模型的建筑构件语义化定义、数据转换及共享应用等过程中遵循通用的 IFC 国际标准。IFC 标准使用 EXPRESS 语言定义，涉及包括建筑控制、消防管道、结构单元、结构分析、供热通风、电气、结构、施工管理等众多领域。最新版本的 IFC4 包含大量的类定义，有 775 个实体，418 个属性集，390 个数据类型。从下往上由资源层、核心层、共享层、领域层 4 层组成。资源层定义了 21 类可重复引用的实体与类型，如几何资源、拓扑资源、材质资源等。核心层定义了 4 类 IFC 模型的基本结构、通用概念和基础关系。共享层提供了 5 类通用对象，如建筑元素、管理元素、设备元素等。领域层定义了特定的 8 类专业领域，如建筑领域、结构分析领域、电气领域等。在 IFC 标准中，只允许上层资源引用下层资源，其可保证拓展领域层时，下层资源不受影响，有利于 IFC 架构的拓展与稳定。

BIM 技术是创建和使用“数字孪生城市信息模型”（CIM）的基础工具，例如建设“智慧建筑”应用系统，可实现城市建筑物的能耗监测和全生命期的动态管控。

3. 3D-GIS

3D-GIS 是以计算机软件和硬件作为依托，以空间数据库技术作为基础，对城市三维空间数据加以科学的分析和管理的，为决策、规划、研究和管理提供逼真信

息的一项全新技术。3D-GIS 是随着计算机可视化技术的发展和 2D-GIS 的成熟，在 20 世纪 90 年代初开始为人们所关注的。在传统的 GIS 领域内，信息主要是以二维平面地图的形式呈现给使用者。这种形式继承了普通二维地图显示的特点，对移动设备的硬件条件要求较低，数据传输量较小，但其直观性和使用体验较差。进入 20 世纪 90 年代后，三维可视化与虚拟现实技术的迅猛发展使得建立 3D-GIS 成为可能。

城市 3D-GIS 技术是将虚拟现实技术用于城市环境及资源的仿真，对城市的真实地形、地上地下景观进行数字化三维模拟，给用户提供一个与真实城市一致的虚拟城市环境，具有三维浏览、三维空间分析、信息检索、辅助设计等功能。3D-GIS 是一个综合性的研究领域，包括了计算机图形、三维可视化、虚拟现实、空间数据结构以及三维空间交互与分析等多项技术。例如最关键的三维可视化技术就是以三维立体的形式利用计算机图形技术和方法，对大量数据进行处理，用图形、图像的形式，形象而具体地显示出来，通过将科学计算过程及计算结果所产生的枯燥数据转换成直观的图形和图像信息，来仿真人脑映像的构造过程，帮助人们洞察数据所蕴含的关系和规律，以支持用户的判断和理解。通过交互式的图形、图像系统，能便捷地获得关于数据的直观、形象、深刻和全面的理解。三维可视化处理的流程包括数据预处理、几何变换、选择光照模型和纹理映射等。

围绕 3D-GIS 领域应用的研究热点有三维空间数据模型、三维拓扑数据模型、三维空间数据库、三维空间查询和三维空间可视化等。与 2D-GIS 相比，3D-GIS 技术利用三维可视化技术对城市空间地理信息进行展现和分析，给人以更为真实的感受。同时，与虚拟现实技术融合，可以将城市现实物理空间环境中的视、听、动等行为全方位展现在数字孪生城市中。同时它具有独特的管理复杂空间对象和空间分析能力。

今天，3D-GIS 技术已经深入到城市的各行各业中，如土地管理、电力、电信、水利、消防、交通以及城市规划等的数字化智能应用。

4. CIM

城市信息化经历了“实体城市→数字城市→传统智慧城市→数字孪生城市”的发展过程。在完全数字化的城市基础上建设数字孪生城市，是城市全面智慧化的关键、是实施新型智慧城市建设极其重要的战略步骤。实现城市彻底数字化的

关键途径就是三维空间地理信息系统(3D-GIS)与建筑信息模型(BIM)之间的模型整合、数据融合和综合集成应用。

但是 BIM 与 3D-GIS 的融合和集成应用并不是简单的将两个技术中的功能直接组合,而是需要建立整合的三维城市信息模型(CIM),对数据进行有序整合(图 43)。

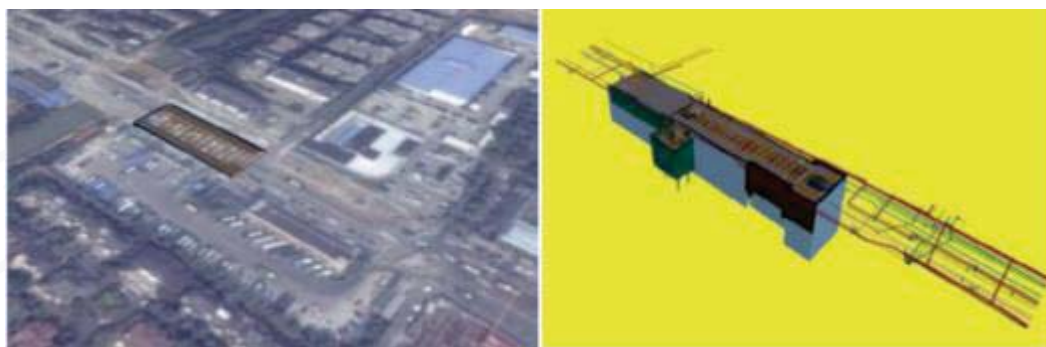


图 43 3D-GIS 环境与 BIM 数据的集成应用(来源:《建筑工程技术与设计》)

CIM 是 BIM 与 3D GIS 的集成应用,是集成实景三维、BIM、新型街景、GIS、遥感等的新型空间信息技术手段,是城市空间信息的高度集成和真实再现,是数字孪生城市的地理空间信息平台 and 大数据集成中心。

在 CIM 构筑的过程中,CIM 遵循的数据交换标准主要是 CityGML。CityGML 是一种用于虚拟三维城市模型数据交换与存储的格式,是用以表达三维城市模板的通用数据模型。它定义了城市和区域中最常见的地表目标的类型及相互关系,并兼顾了目标的几何、拓扑、语义、外观等方面的属性,包括专题类型之间的层次、聚合、目标间的关系以及空间属性等。在尺度表达上, CityGML 采用多尺度建模方式,即 5 个层次细节(LoDs)描绘了从城市宏观场景到建筑物内部的不同尺度、不同细节的信息。LoD0 本质上是 2.5 维的 DTM(数字地面模型)叠加在影像或地图上的粗糙表达,包含了建筑物的屋顶平面和底层平面。LoD1 是块模型,建筑物表达为具备平顶结构的柱形体。LoD2 为不同建筑加入了不同的屋顶结构和边界表面。LoD3 为建筑提供了更加详细的墙、屋顶结构,甚至门、窗信息。LoD4 是对 LoD3 的进一步完善,增加了详细的室内结构,如家具、楼梯等,具有最详细的几何、语义信息。

CIM 及支撑平台是城市数字孪生体的信息载体,也是数字孪生城市的基础设施。该技术可构建微观宏观一体的、动态增长的、可支撑业务应用的、可更新和可追溯的全方位城市时空信息孪生模型,是实现城市数字孪生体资源集中管理与

应用、信息互通与共享，并保证数字孪生城市规划一张蓝图的有效性和实时性的重要工具。

5. 城市仿真

随着城市化建设水平的飞速发展，城市建设项目改造大规模开展，投资大、涉及面广，且对城市风貌、群众生活影响越来越大，城市规划、设计、建设、管理的难度大大提高。为避免顾此失彼、反复开挖等劳民伤财的城市建设顽疾，迫切需要采用城市仿真等技术手段，来协调建筑、道路、地下管线等建（构）筑物之间的关系，辅助城市规划、建设和管理等工作。

仿真研究于上世纪 40 年代起源于工业界。从 60 年代开始，计算机图形处理技术迅猛发展，城市仿真研究进入了科学家视野。克鲁格等人将他们设计的未来建筑显现在他们发明的虚拟工作平台上，建筑学家们聚集在一起透过所佩戴的液晶眼镜，就可以看到建筑的立体影像，可视化成为仿真技术在城市规划中应用的切入点。自从 Goal 在 98 年提出数字地球（Digital Earth）之后，世界各地掀起了数字地球热，限于当时科学技术和硬件水平，涉及到的学科众多，以及需要极大的人力和物力，数字地球的研发和应用发展缓慢。

2005 年，Google 推出 Google Earth，彻底颠覆了人们的传统思维局限，人们可以利用 Google Earth 在瞬间浏览查看世界的任何角落。Google 还在其基础上组织全球信息，并允许人们查询、标注、上传感兴趣的信息。它界面直观、数据丰富、功能强大，标志着城市仿真进入社会化、产业化应用阶段，在国内外已经得到了越来越多的应用。城市仿真前所未有的人机交互性、真实建筑空间感、大面积三维地形仿真等特性，都是传统方式所无法比拟的。

城市仿真是通过将建筑物及其它设施的位置、高度、外观、空间形态等要素进行数据分析和处理，建立城市仿真模型，用于规划真实环境，开展各类论证、试验、分析、运行、训练等工作，服务于城市规划、建设、管理等领域的一门新兴技术，它主要的应用方式有城市应急仿真、城市规划仿真、城市实时仿真等：

- 城市应急仿真：是指在地震、洪汛、台风等自然灾害发生时，或者踩踏、恐怖袭击等人为灾难时，能够第一时间模拟出最佳的应急方案，在最短的时间内给出救援指导意见，能够为救援争取更多的有利空间和提高救援效率；

- 城建规划仿真：能够更快更真实的模拟出规划设计的方案和效果，同时能够根据建筑项目的评判标准来检查方案是否符合规划要求和建筑标准；
- 城市实时仿真：建立一个与现实城市同步的数字虚拟城市，收集城市中各个方面的动态数据，实时监测和仿真分析，建立一个基于物联网和服务的城市管理架构。虚拟城市能够在任意角度和观察场景中实时体验已经存在的道路交通体系，还可以在虚拟城市中整合仿真，进行再规划，优化城市治理水平，使城市变得更加“智能”。

在数字孪生城市应用中，运用城市仿真技术，可进行自然现象、物理力学规律、人群活动、自然灾害等仿真，比如可预测台风灾害、优化应急预案；可通过地形分析，进行风电选址，并分析其对城市的影响；可进行城市风、水、污染物、热岛等现象进行仿真和演进态势预测。通过城市仿真可以为数字孪生城市实现城市问题诊断、解决方案辅助设计、方案验证、未来预测等、从而为城市智慧治理提供数据、决策支持。

6. 人脸识别

近年来，IT 和 DT 等技术发展迅速，为人们实时传播各种信息，方便生活的同时也对个人隐私安全提出了挑战。在现代社会，个人身份的快速、高效识别是保护个人隐私和财产的必要手段。传统的身份识别方式（ID 卡、个人证件、门禁口令、银行卡账号密码等）都存在不同的漏洞和隐患。现实需求下，身份识别专家提出了准确、可靠的以人脸识别为代表的生物识别技术。

人脸识别系统的研究始于 20 世纪 60 年代。80 年代后，随着计算机技术和光学成像技术的发展，人脸识别技术得到提高。而真正进入初级应用阶段则在 90 年后期。人脸识别系统成功的关键在于是否拥有尖端的核心算法，并使识别结果具有实用化的识别率和识别速度。人脸识别系统集成了人工智能、机器识别、机器学习、模型理论、专家系统、视频图像处理等多种专业技术，是生物特征识别的最新应用。

人脸识别是基于人的脸部特征信息进行身份识别的一种生物识别技术。其构成有十大关键技术，分别是：

- 1) 人脸检测 (Face Detection)：检测出图像中人脸所在位置；
- 2) 人脸配准 (Face Alignment)：定位出人脸五官关键点坐标；

- 3) 人脸属性识别 (Face Attribute): 识别出人脸的性别、年龄、姿态、表情等属性值;
- 4) 人脸提特征 (Face Feature Extraction): 将一张人脸图像转化为一串固定长度的数值;
- 5) 人脸比对 (Face Compare): 衡量两个人脸之间相似度的算法;
- 6) 人脸验证 (Face Verification): 判定两张人脸图是否为同一人的算法;
- 7) 人脸识别 (Face Recognition): 识别出输入人脸图对应身份的算法;
- 8) 人脸检索 (Face Retrieval): 查找和输入人脸相似的人脸序列的算法;
- 9) 人脸聚类 (Face Cluster): 将一个集合内的人脸根据身份进行分组的算法;
- 10) 人脸活体 (Face Liveness): 判断人脸图像是来自真人还是来自攻击假体(照片、视频等)的方法。

人脸识别不但简洁快速,而且利用它进行身份的认定,具有安全、可靠、准确的特点,同时更易于配合城市数字孪生体和安防、监控、管理等广泛应用的整合,提升数字孪生城市智能化程度,例如:在数字孪生城市智能安防应用中的刑侦追逃、罪犯识别以及边防安全监控等;智慧政务应用中的养老人员身份认定、办税实名认证、社会福利和保险等;智慧社区应用中的门禁控制和出入管理等。

(五) 数字孪生城市的典型应用场景

面对当前城市管理中的众多挑战,若想要突破传统智慧城市的禁锢,逐步转变升级为“数字孪生城市”,依旧有许多问题需要思考。

战略、数据、科技、能力、开放、创新、生态、方案、安全等都是未来发展的重要关键词。特别是在数据领域,从孤立的数据集到来自各个渠道的数据整合,从单一领域的解决方案到各个领域的统一解决方案,数据将直接影响数字孪生城市发展的广度和深度。

从当前传统智慧城市建设的典型案例中可看出其各领域仍有数据割裂的问题。未来数据孤立将被打破,实现不同领域数据的交叉与融合,打造数据互联互通、有序整合和综合应用的数字孪生城市。

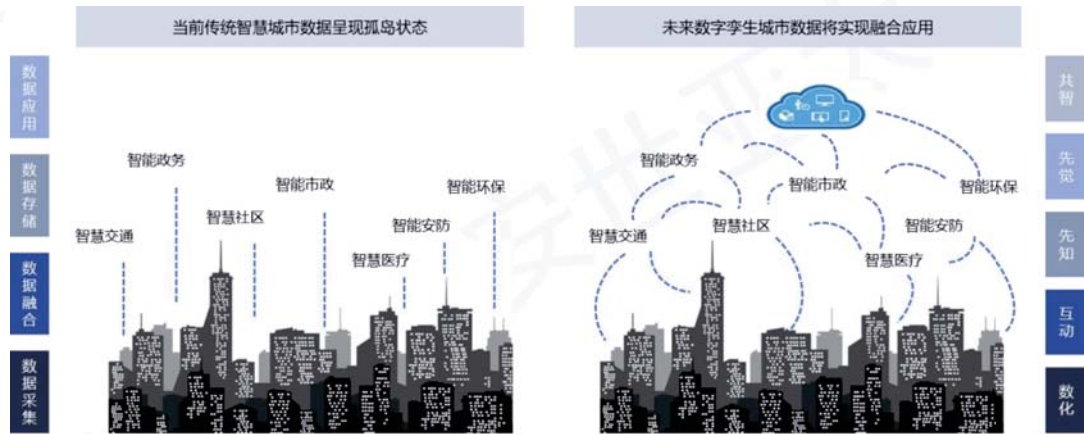


图 44 传统智慧城市与数字孪生城市数据的不同应用特征
(来源: 安世亚太与泰一数据)

在数字孪生城市建设的推进上, 首先从物理世界向数字世界基于模型的“数化”开始, 到虚实结合的“交互”, 再到基于仿真和大数据的“先知先觉”, 直到数字孪生城市各数字孪生体之间以及不同城市数字孪生体之间的协同“共智”, 最终达到理想状态。

其中双向“交互”、“先知先觉”和“共智”是数字孪生城市区别于传统智慧城市的重要标志(图 44), 其典型应用场景如下:

1. 智能市政管理

在过去的城市化建设过程中, 由于市政规划不合理造成堵城、睡城等现象严重, 土地资源经济能效低。为解决以上问题, 在数字孪生城市的建设过程中, 需要基于城市数字孪生体, 依靠大数据和人工智能等技术, 通过挖掘城市不同样本特征, 对多源异构数据进行融合, 从点规划、线规划到面规划, 为城市管理者提供智能市政管理解决方案。

例如现代化城市市政建设过程中, 许多城市的雨水排水管道经常会出现堵塞现象, 严重影响排水, 致使道路频繁出现积水, 给人们的生活和出行带来严重不便。另外, 井盖被盗、损坏的现象也时有发生, 造成行人跌落下水道的惨剧出现。为了便于管网维护, 井盖通常都设置在道路等开阔空间, 而对道路交通流量进行监控, 则是实现智能交通的基本要求。基于数字孪生城市的全域感知技术, 赋予井盖智能化感知功能, 可为城市市政和交通管理者打造一款能够远程监测状态、车流量, 以及管道堵塞情况等信息的智能井盖, 同时能够在出现问题时及时报警并做出高效处理方案的智能井盖管理平台。该平台可同时完成城市水流状态监测、

井盖姿态检测、地表环境监控、温湿度检测、车流量监测等功能应用。

基于城市数字孪生体和物联网技术等,通过智能感知设备、无线网络、污水处理设施、给排水管理、智能井盖、水质水压表等在线监测设备实时感知城市供排水系统的运行状态,并采用可视化方式整合城市水务管理部门与供排水设施,形成“城市智慧水务孪生体”,将海量水务信息进行及时分析与处理,并做出相应的处理结果辅助决策建议,以更加精细和动态的方式管理城市水务系统的整个生产、管理和服务流程,保障居民用水安全,从而达到数字化智能应用的状态。例如可融合环境监测数字孪生体,结合城市工业排废、城市固废处理、环境卫生污染监测等大数据模拟仿真分析,预测未来时刻水质污染发生时间和状况,促使城市环保部门和水务部门及时调整控制,避免城市居民用水安全事故发生。

未来基于市政数字孪生体和城市建筑信息模型,结合区域光照时间、智能建筑能耗等大数据还可以为城市市政及建筑规划提供贯穿整个城市市政或建筑规划流程的辅助决策,如进行与精细建筑模型结合的建设用地拆迁分析、控高分析、光照分析、视域分析、天际线分析、规划方案同步对比等应用。同时基于市政数字孪生体的地下管网数据还可以与周边城市市政数字孪生体的地下管网数据融合应用,以助于涉及城市间居民能源和互联应用需求的油气、电缆、通信光缆等地下管网实现三维可视化、数据分析、安全隐患识别,为管网选线、改线提供支持性决策方案,为城市协同应急预案提供支持。

2. 智能运行管理

基于数字孪生体与GPS卫星定位、智能传感、智能摄像等技术,可突破传统模式,实现城市地上地下空间的运行异常状态智能监控,指导数字孪生城市的建设、评估和运行管理。如通过城市信息模型建立起三维城市空间模型,实现城市规划、建设、运行管理的全面立体可视化管理,支持城市模拟仿真、分析验证等,实现城市运行智能化监管。

可借助先进的视频分析技术自动分析特定区域的人群活动,如客运站人群监测、城市交通综合管理、春运指挥等,为管理部门提供智能决策支持,为城市居民持续改善生活体验。同时可基于数字孪生城市与实体城市的交互,通过不断学习、推演、预测可能出现的城市运行瓶颈问题,提出科学的决策,并建立一个不断自我更新、进化的智慧城市。

例如固废处理问题是现代化城市运行管理中面临的严峻挑战之一。处理流程由各不同环节组成,如废物收集、运输、加工、处理和监测等,废物处理耗费巨大的费用、时间和人力。基于物联网技术赋予城市中各垃圾桶和垃圾清运车智能感知功能,实时采集城市各处废物信息,如垃圾数量、垃圾种类等等,构建智慧固废处理动态网络。城市环卫部门可基于相关数据用于开发垃圾收集优化策略,借以节省垃圾清运车的燃油费用。回收处理公司可基于数据预测和追踪流入其公司的待处理废物的来源,从而实现内部处理的优化。卫生监管部门则可以对废物处理过程进行监测和监督,不必再另行耗费巨资进行人工监测。当直接获取数据困难时,可借助附近设施(如通过路灯上的通信设备或其他拥有丰富能源和通信能力的设施)间接获取城市中产生的固废数据,也可以通过垃圾清运车、环卫部门其他车辆、或在当地运行的公交车辆等完成数据的采集。

未来还可基于城市运行数字孪生体、市政数字孪生体、环保数字孪生体、产业数字孪生体等多源数据融合,制定出合理引导城市固废处理的政策措施。如构建城市生态循环产业园等,降低城市固废增量及变废为宝,以实现经济发展和环境保护的目的。同时实现社会效益和经济效益、环境效益相平衡,推动无废城市建设和产业可持续发展。

3. 智慧交通管理

我国城市化的飞速发展,为城市公共交通的管理水平带来日益复杂的综合性挑战。交通管理问题成为几乎所有城市的通病,浪费了大量市民时间与石油能源。面对就业与居住空间分离、超大规模路网、复杂车流变化,以人力为主的交通管理效率成为制约整个城市发展的短板。

交通作为城市经济活动的命脉,对于城市经济发展和人民生活水平的提升起到重要作用。为了更好适应城市交通量的增长趋势,缓解城市交通拥堵状况,需要做好对车流量的有效控制,加强对基础交通设施的建设,实现交通信号灯的智能化管理和优化控制。

基于城市交通数字孪生体可对车流量数据和道路设施实时传递数据进行分析预判,同时可对交通信号灯进行实时优化控制。基于城市交通历史数据,可预判某个区域未来 10 分钟至一小时的交通态势,帮助交通管理部门在交通堵点出现前制定应急预案、提前实施交通疏导措施。如根据赛事演出活动、天气数据预

判特定时间段的交通状况。

发生交通事故需要紧急医疗救援时,可进行区域路况全景识别与优化,为救护车规划最优导航路径,对车辆到达下一个路口时间实现秒级精准预测,“零时差”自动调控红绿灯,可大幅缩短救护车通勤时间,同时减少对城市正常交通的影响。

近年来,由于私家车数量的不断增长,导致停车位供不应求,造成了交通拥堵、违规停车等诸多问题。基于对停车场和车辆拥有量、重点区域车流量数据等进行分析,可发布停车引导动态信息,并对停车场流量进行实时监控及预测,提高停车位流转率。同时可基于路灯杆、充电桩等交通基础设施的智能传感监测构建路侧智能停车场,有效解决违章停车造成交通拥堵的问题。

未来基于城市交通数字孪生体,可将遍布全城的交通传感器、视频图像数据、公交车出租车、互联网导航数据进行多源融合,构建围绕交通量、拥堵指数、主干道速度、快速路速度、安全指数的五大“城市交通生命体征指标体系”,不同类别数据间取长补短、交叉验证,帮助交管部门在详实可靠的实时数据基础上,实时监测预警,并快速执行交通精准治理,避免牵一发动全身的连锁反应。

4. 智能环保管理

基于数字孪生城市信息模型(CIM),可实现城市资源环境的智能协同监管。如:实现城市规划编制、实施、评估和监督方面的智能化监管;建立土地资源立体化、智能化管理,实现环保与能源、水资源、交通及城管智能协同监管与服务。

造成环境污染是由多方面因素引起的,比如大气、土壤、水质、噪声、固废等,随着大数据、物联网、云计算等技术的快速发展,城市管理者可基于数字孪生城市中的海量环境数据来进行监测和预测演进态势,最终得以用更加精细和动态的方式实现城市环保治理和决策,如通过打通环保局、气象局、交管局等各个系统的数据,并利用城市大数据和人工智能技术对环保数据进行分析,辅助管理部门进行事前规划、实时监控、未来预测和历史溯源,及时锁定污染源头,快速进行城市环保问题的精准治理。

城市圈协同发展是未来城市化建设的趋势,未来基于城市与城市之间的环保数字孪生体、产业数字孪生体、气象大数据等多源数据融合,可实现城市圈区域

内的水污染源、气污染源、水环境、大气质量、噪声、生态环境的全面动态监控，为城市圈环境质量、污染防治、生态保护、辐射管理等协同业务提供更智慧的决策。

5. 智能安防管理

基于城市智能化基础设施视频监控探头，结合视频图像的智能识别分析功能，可实现对各类警情、灾情、生态破坏、道路违章、环境卫生等的可视化展示，从而实现城市安全防范预警、提示、资源优化管理等。如某地发生打架斗殴、盗窃事件、疑犯追踪、被拐或走失人员等事件，视频监控可以自动识别，在安防管理系统上显示并进行精准分析、整体研判和协同指挥，同时调动附近警力进行处置，实现对警力的优化配置。

未来基于安防数字孪生体和城市建筑物信息模型，融合消防应急数据和信息资源，可实现城市消防能力及信息的统一管控，打造城市智能化的消防应急指挥系统，辅助现场工作人员进行最佳救援路线选择和火灾救援工作，提高灾害预防、处置和应急救援能力。同时还可基于数字孪生体制定消防演练方案，对消防人员进行业务培训，提升消防人员紧急应变能力。

6. 智慧医疗保健

智慧医疗保健是数字孪生城市智能化应用的重要组成部分。通过移动监测、移动诊室、无线远程会诊、智慧处方、医疗信息云存储等智能技术手段，可提升城市诊疗覆盖面与效率，促进城市医疗资源的合理化分配。进一步利用物联网技术构建“电子医疗”服务体系，实现医疗监护设备的小型化、无线化、发展智慧家庭健康保健、智能健康监护，可大幅降低城市公众医疗负担，缓解城市医疗资源紧缺的压力。

基于患者的健康档案、就医史、用药史、智能可穿戴设备监测数据等信息可在云端为患者建立“医疗数字孪生体”，并在生物芯片、增强分析、边缘计算、人工智能等技术的支撑下模拟人体运作，实现对医疗个体健康状况预测分析和精准医疗诊断。如基于医疗数字孪生体应用，可远程和实时地监测心血管病人的健康状态；当智能穿戴设备传感器节点测量到任何异常信息时，救援机构可立即开展急救。同样通过医疗数字孪生体还可通过在患者体内植入生物学传感器来全天监控其血糖水平，以提供有关食物和运动的建议等。

精准医疗是未来的诊疗模式。基于医疗数字孪生体，医生可通过对患者健康大数据（基因、生活习惯、家族病史和病例）的搜集和分析，进而提出个性化、针对性的治疗方式和药物，实现精准诊断与治疗。这种模式不仅用于患者的疾病治疗，更侧重于对人们疾病的预防。最大的可能是医生根据患者的基因、生活习惯等因素制定独特的药物和方案。个性化药物使医疗效率得到优化，药物副作用降低，住院率下降，最终会体现在患者整体医疗成本的下降，也缓解了医疗资源的不足问题。

对于城市管理而言，掌握了城市居民群体的医疗数字孪生体，有助于合理规划 and 分配医疗资源，以及辅助社保、扶贫等政策制定。

7. 智能服务管理

基于数字孪生城市下万物互联产生的海量数据，政府可建设“智能城市 APP”，建立跨部门跨地区业务协同、共建共享的信息服务体系，创新发展教育、就业、社保、养老、医疗以及文化的服务模式，通过聚合社保、交通、医疗等应用，使市民足不出户即可享受方便快捷、优质高效的生活服务。

基于城市数字孪生体和政务数字孪生体，可简化政府各项行政事务审批流程，实现一网通办理及提供一站式服务，如企业注册、税务、工商等事项综合处理；同时政府对政策实施的效果进行仿真模拟，预测可能出现的瓶颈问题，以助于政府及时调控，最大程度合理化配置公共服务资源。

8. 智慧社区管理

基于数字孪生城市建设，智慧社区为城市社区居民建立一个安全、便利的数字生活社区，从而形成一种以数字化、智能化为基础的新社区管理模式。

例如可通过在社区建筑建立含有 ICT 系统的能源监控系统，集成利用先进的物联网技术、智能化统计和计算建筑内空调、电灯、电视等各项能耗数据，根据居民生活习惯进行预测和动态调控。还可以通过远程反应监测老年人用电用气安全，如老人在做饭时忘关闭天然气，发现不符合以往习惯的异常情况，则系统可以及时发出警报，减少事故发生，保证老年人的居住安全。



图 45 智能家居管理中心（来源：资本实验室今日创新观察）

未来基于社区数字孪生体、智能建筑和物联网等多源技术和数字的融合，我们的家居生活将变得越来越智能。因此需要一个中央管理系统对安全系统、电视网络、Wi-Fi、冰箱、太阳能、热水器、厨房设备、暖气/空调等系统进行统一管理。数字孪生体技术是其中的重要组成部分，该系统也将成为对未来家庭需求管理至关重要的智能系统（图 45）。

9. 智慧景区建设

智慧景区指基于景区数字孪生体对景区地理、自然资源、旅游者行为、景区工作人员、景区基础设施和服务设施进行全面、透彻、及时的感知，对游客、景区工作人员行动实现可视化管理，优化再造景区业务流程和数字化智能运营管理，提高服务质量，实现景区环境、社会和经济的全面、协调和可持续发展。

对于景区管理机构和商业机构来说，可基于景区数字孪生体，对旅游淡旺季的游客数据、意外和应急处理事件、景区设施利用率和故障率、景区商业销售数据等进行模拟仿真分析，并进行未来预测，并根据预测结果进行持续优化调整。

具体应用场景如：对节假日客流进行预测，并进行不同决策方案的模拟仿真和优化。如增加景区观光车数量、观光车游览路径优化、周边交通站点的公交短驳接送和引导、景点票价折扣调整、景区游乐设施安全保障措施制定、景区应急处理方案的优化等，在不同的可选方案中采取最佳决策。景区商业机构还可根据历史商品销售的大数据预测分析进行商品调配和售价调整、移动销售网点的增加与布置、酒店房源及价格调整、餐饮食材采购和库存调整等。

未来景区数字孪生体与产业数字孪生体“共智”，还可进行景区产业监测、客源地分析、用户画像、游客满意度、商家信用诊断、景区营销等分析，为管理

者提供商业运营方案,扩大收入来源,反哺资金投入,促进城市旅游产业的可持续发展。

(六) 数字孪生城市的典型应用案例

1. 项目简介

“虚拟新加坡”是一个动态的三维城市模型和协作数据平台,包括新加坡的3D地图,成为供政府/企业/私人/研究部门使用的权威3D数字平台。

“虚拟新加坡”是一个包含语义及属性的实景整合的3D虚拟空间,通过先进的信息建模技术为该模型注入静态和动态的城市信息数据。该项目覆盖范围718平方公里、500-660万人口、16万幢建筑物、5500公里街道。于2014年-2016年1月完成城市空间初步数据采集,包括地理信息和城市设施(公交站、路灯、交通信号灯、高架桥)。

该项目得到了新加坡国家研究基金会(NRF)、新加坡总理府、新加坡土地管理局(SLA)和新加坡政府技术局(GovTech)的支持。NRF领导项目开发,而SLA将通过其3D地形图数据提供支持,并在虚拟新加坡建成后成为运营商和所有者。GovTech根据项目要求提供信息和通信技术及其管理方面的专业知识。其他公共机构在各个阶段参与虚拟新加坡建设(图46):



图 46 实景整合 3D 的虚拟新加坡(来源:新加坡政府技术局)

2. 项目可实现的具体应用

“虚拟新加坡”使来自不同领域的用户能够开发复杂的工具 and 应用程序,用于概念测试、服务、规划决策以及技术研究,以解决新加坡面临的新兴和复杂挑战。其可实现的具体应用包括以下几个方面:

合作与决策:利用不同公共部门收集的图形和数据,包括地理、空间和拓扑

结构以及人口统计、流动和气候等传统和实时的数据，“虚拟新加坡”的用户能打造丰富的可视化模型并大规模仿真新加坡市内真实场景。用户能以数字化的方式探索城市化对国家的影响，并开发相关解决方案如优化环境、灾难管理、基础设施、国土安全及社区服务等有关的后勤、治理和运营。“虚拟新加坡”集成了各种数据源，包括来自政府机构的数据、3D 模型、来自 Internet 的信息以及来自物联网设备的实时动态数据。该平台允许不同的机构共享和查看同一区域内各个项目的计划和设计。例如：虚拟新加坡可以根据当前和未来市政工程的规划提供一个可视化景观，这有助于相关机构能够相互协作，以协调各自的工程并优化整体设计和实施；可以在新设施周围建立通路，以在改扩建工程期间重新定向人流和交通流，最大程度地减少给公民带来的不便；在虚拟天桥中，规划人员可以预览人行天桥的各种设计方案，以及如何将其与已经进行了改造的社区公园无缝集成（图 47）。



图 47 虚拟新加坡一决策优化应用（来源：新加坡政府技术局）

交流与可视化：“虚拟新加坡”提供了一个方便的平台，以可视化方式与市民进行交流，并允许他们及时向相关机构提供反馈。例如，雨花庄园是美国住房和发展委员会绿色计划的试验基地，该计划具有可持续和环保功能，包括太阳能电池板、LED 灯、气动废物输送系统、增强的行人网络和扩展的自行车网络等。随着其对应的虚拟庄园的完成，美国住房和发展委员会可以用来展示绿色计划的可行性和好处。

改善公众可访问性：“虚拟新加坡”包括地形属性，例如水体、植被和交通基础设施。这与传统的 2D 地图不同，后者无法显示地形、路缘石、楼梯或坡度。作

为对自然景观的准确表示，“虚拟新加坡”可用于识别和显示残疾人和老年人的无障碍路线。他们可以轻松找到通往公交车站或地铁站的最便捷路线，甚至是被遮蔽的道路。公众也可以通过“虚拟新加坡”的可视化公园来计划其骑行路线(图 48)。



图 48 虚拟新加坡—可访问性改善应用(来源:新加坡政府技术局)

支持城市规划:“虚拟新加坡”可以提供有关全天环境温度和日照如何变化的信息。城市规划人员可以直观地看到建造新建筑物或装置(例如雨花庄园内的绿色屋顶)对温度和光强度的影响。城市规划人员和工程师还可以在“虚拟新加坡”上叠加热图和噪声图,以进行仿真和建模。这些措施可以帮助规划人员为居民创造更舒适、更凉爽的居住环境。“虚拟新加坡”还支持半自动化的规划流程,规划人员可以根据预设参数快速过滤感兴趣的建筑物。例如,在根据 HDB Greenprint 计划确定适合安装太阳能电池板的 HDB 块时,城市规划人员可以根据指定标准(例如层数和屋顶类型)快速过滤合适的块(图 49):



图 49 虚拟新加坡—支持城市规划应用(来源:新加坡政府技术局)

太阳能生产潜力分析:“虚拟新加坡”提供了建筑物高度、屋顶表面和日照量等数据。这使城市规划者可以分析哪些建筑物具有较高的太阳能生产潜力,因

此更适合安装太阳能电池板。进一步分析可使计划人员估计一天可产生多少太阳能，以及节省的能源和成本。通过与相邻建筑物历史数据的交叉引用，来验证以上分析的正确性，并进行季节性调整以反映出更准确更精细的预测（图 50）。



图 50 虚拟新加坡—太阳能生产潜力分析（来源：新加坡政府技术局）

虚拟实验与测试：“虚拟新加坡”可用于虚拟测试或实验，例如可用于检查 3G/4G 网络的覆盖范围，提供覆盖率差的区域的可视化地图，并突出显示可在 3D 城市模型中改进的区域。“虚拟新加坡”还可用作测试平台，以验证服务的提供。例如，新体育中心的 3D 模型可用于模拟人群分散，以在紧急情况下建立疏散程序。

3. 项目给用户带来的价值

通过适当的安全和隐私保护，“虚拟新加坡”使政府、公共机构、学术界、研究界、私营部门以及社区能够利用信息和系统功能进行政策和业务分析、决策制定、测试想法、社区协作和其他需要信息的活动。其应用带来的好处如下：

政府：“虚拟新加坡”是一个关键的推动者，将加强各种 WOG 计划（智能国家、市政服务、全国传感器网络、GeoSpace 和 OneMap 等）；

公民和居民：“虚拟新加坡”中的地理可视化、分析工具和 3D 嵌入式信息将为人们提供一个虚拟而现实的平台，以连接和创建丰富社区的服务；

企业：可以利用“虚拟新加坡”内的大量数据和信息进行业务分析、资源规划和管理以及专业服务；

研究机构：“虚拟新加坡”的开发创造了新的技术，如语义三维建模是一个新兴领域，可用于在多方协作、复杂分析和测试应用场景下的核心技术。

八、数字孪生战场

(一) 现状

数字孪生体作为一种信息技术发展的新兴技术,军事战场方面的应用是其重要方向之一。从历史经验看,军事历来都是最新技术的发展者和应用者。2011年3月美国空军研究实验室(AFRL)的一次演讲明确提到了数字孪生体。2012年美国空军与NASA合作召开了数字孪生体技术研讨会,以及近来美国海军立项的舰艇数字孪生体项目等可以初窥数字孪生体技术在军方的应用情况。在军事领域,数字孪生体技术在战场上的应用是最有价值的场景。

当前,无论是军事装备发展还是指挥系统建设,美国依然是世界第一。指挥自动化系统是军事战场的重要组成部分和数字孪生体应用的重要领域。美国陆军战役级的指挥自动化系统的构成主要有机动控制、火力支援、防空等几个部分组成((图 51 (a)),其中机动控制系统是从上到下的各级指挥系统信息和战场态势分析与指挥中枢,也是火力单元的具体体现。随着数字孪生体技术的应用和发展,美国指挥自动化系统正在向以数字孪生装备方向发展,且诸兵种将趋向一致。将来有可能将指挥自动化系统构筑成以数字孪生战场为依托的系统(图 51 (b))。

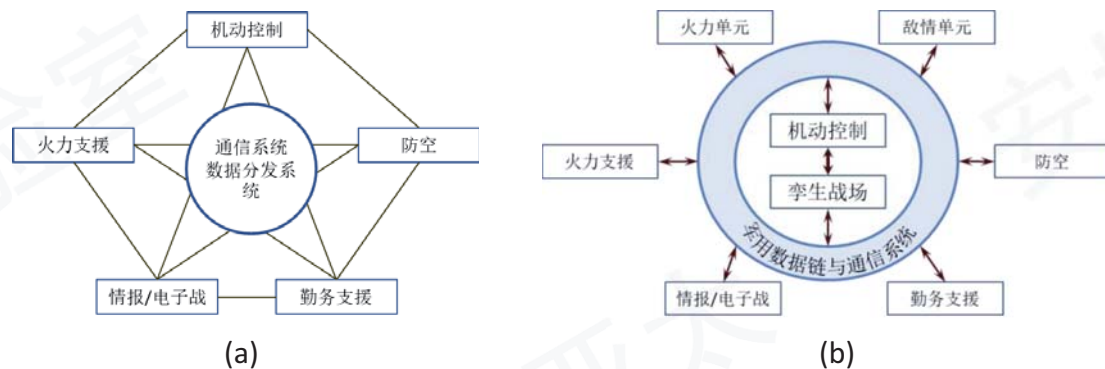


图 51 指挥自动化系统演化图

在以美国为首的发达国家的指挥自动化系统的各个组成部分中,虽然都没有明显提到数字孪生体,但相关技术已经在其中得到了应用。战场态势已经能够以简单模型的方式呈现在各级指挥官面前。通过军用数据链的应用,数字孪生战场基本达到成熟度模型的“互动”层次,甚至达到“先知”水平。无人装备方面已基本实现“先知”。

数字孪生体在战场上应用的另一方向是训练系统。战争是解决问题的最后手段,但也是高风险的。影响战争成败的因素很多,任何国家也不会轻易发动战争。

因此不同形式、不同用途的对抗演练系统就成为数字孪生战场的新场景。在这个方向上，数字孪生体并没有与物理实体建立一一对应关系，因此数字孪生体技术在这方面的应用是偏面的，也就是达到“数化”水平。目前，对抗演练系统的建设水平也以美国为代表，已经形成了比较完备的技术路线图和规范，以及若干共性技术和产品。

（二）综述

人类文明史也可以说是一部战争史，战争是人类发展的主旋律。绝大多数技术总是首先应用并成熟于军事。虽然目前国内外数字孪生体在军事领域应用的报告、文章和报道不多，但并不代表不用。所谓“兵者诡道”，有示之于无、少示之于多，在世界战争史上屡见不鲜。

总体来讲，数字孪生体作为一种新理论和新技术在战争应用的作用可谓之于“察”，使战争进行和战争效果显性化，从而辅助于战争决策。数字孪生体技术在军事方面的应用又可以分为单体装备应用和战场综合应用。前者主要用于装备的研发、维护和保养等，属于数字孪生制造（参见第五章）的范畴；后者主要是通过数字孪生体完成或服务于战场目标的达到，是一个复杂的、体系级的数字孪生体高层次应用。本章主要针对这个领域进行展开讨论。

军事战争从上到下可以分为战略（决策）、战役、战术三个层次。从未来和理想角度上讲，数字孪生体技术应当满足所有战争层面的应用。

在战略决策层面，影响因素（即数字孪生体应当建模的对象）包括：经济因素、政治因素、军事因素、科技因素、文化因素、领袖意志等。就世界范围内的现状来讲，战略层面的研究还多由智囊团运用头脑风暴和人工推演的方式完成，如美国空军战略 2020-2030、美国空军 2025 等就是这样的产物。实际上，因目前技术所限，人类社会的数字孪生体尚不可能完整建立。战略决策所考虑的诸多要素基本还处在粗略的数值研究阶段，当然这个粗略的数值分析模型也可以认为是数字孪生体的基础和基本体现。

在未来可预的时间内，战略层面的数字孪生体还将以基础技术研究为主，但有可能出现某个特定应用领域的、基于数值模型的数字孪生系统，用于推演和评估未来的态势（图 52）。但将个体化的人考虑在内的复杂系统在近期内难以出现。

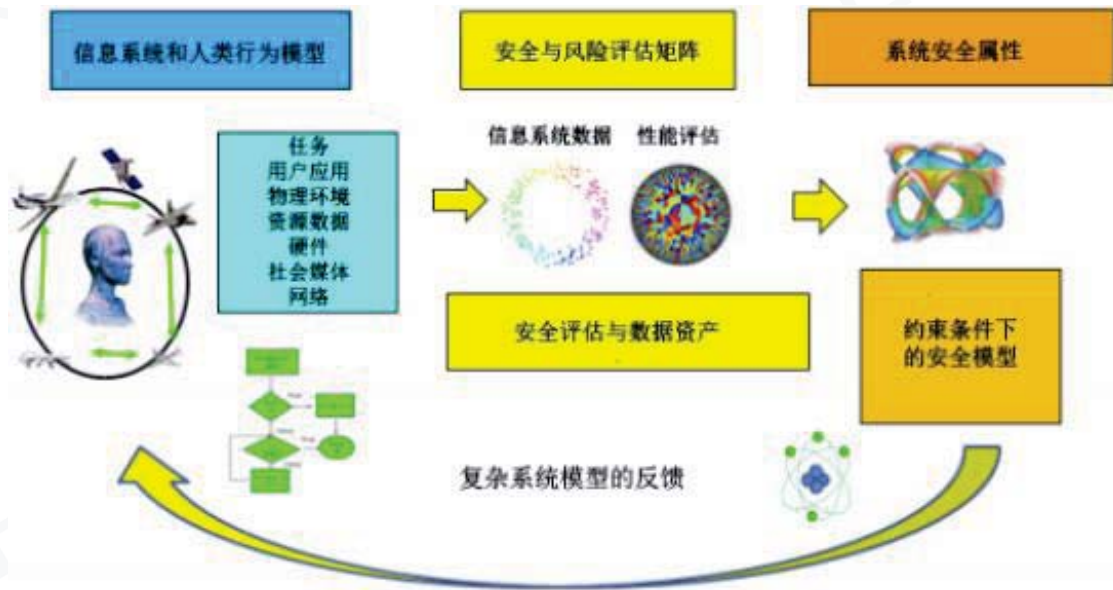


图 52 包含人类行为建模的系统构想图 (来源:《Cyber Vision 2025》)

战役层面主要是指在各级战役指挥官的指挥下,由各军兵种协同完成战役任务。涉及的因素包括:战场环境、作战装备、作战人员、支援装备等。作为数字孪生体在战争中的应用,战役级的数字孪生体是最有价值,也最为可能的。当前可以见到的数字孪生体应用也多集中于这个层次,用于解决军事装备的维修和寿命预测,或用于解决当前备战与未来作战任务的研究等等。未来作战任务研究中,除人工推演外,还可以通过战役数字孪生体为基础的军事体系对抗平台来实现模拟推演,甚至进行完全的数字孪生战争。这种场景已经在科幻小说与电影中出现,如《安德的游戏》电影等。战役级的数字孪生体以军用数据链为核心的研究也正在开展中,如:《Cyber Vision 2025》、《DEPARTMENT OF DEFENSE STRATEGY FOR OPERATING IN CYBERSPACE》等报告中多有涉猎(图 53)。

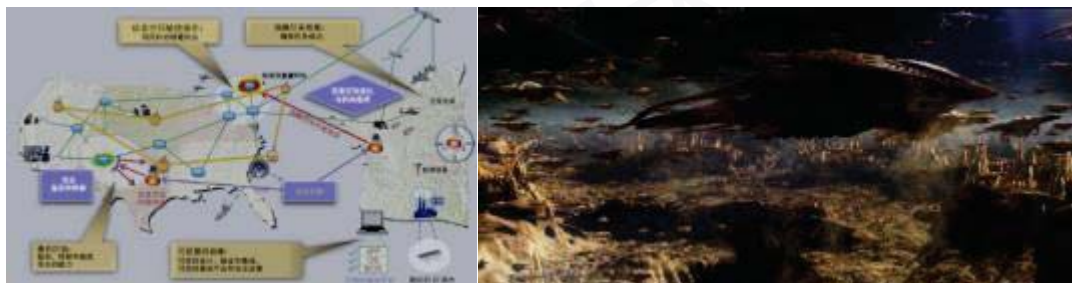


图 53 数字孪生战争 (来源:《Cyber Vision 2025》和《安德的游戏》)

随着无人作战装备与系统的应用和普及,未来战争中有可能出现以有人装备为核心、众多无人装备参与的作战群,或由无人装备独立构成的作战群来完成战役级作战任务。战场指挥官远离战场,但可通过面前的数字孪生体来完成战役指

挥任务，从而达成战役目标。这将是数字孪生战场的一个典型范式。

通过若干年前出现的游戏、半实物仿真模拟器以及近年出现的虚拟头盔等系统，战术层面的数字孪生体可以说已基本实现。人们最熟悉也最为典型的莫过于CS 游戏和飞机训练模拟器，其背后支撑软件皆由基本的战场环境数字孪生体、单兵作战装备（或其他类型的军事装备）的数字孪生体、作战效果的评估等部分组成。由于这些游戏已经与真实战场场景相似，因此也在军事训练中也得到了部分应用。军事装备模拟器已经与真实装备非常相近，所以已经成为必不可少的军事装备。

理想的数字孪生体参考模型要求虚实之间的实时互动。在战术层面的数字孪生体中，士兵做为物理实体时，应用虚拟头盔等装备基本实现了虚实交互。其它情形下还普遍没有与真实装备相连接，没有实现虚实结合，预测与优化也多在线下完成。在未来，随着无人装备（无人机、无人车、无人艇）技术的发展，最可能实现的数字孪生体的战术应用场景就是建立与真实无人装备连接的数据孪生体，实现远程应用与控制。

总结来说，数字孪生体技术在战争中的主要应用方向和场景如下：

- 1) 服务于战场指挥官与领袖决策的数字孪生对抗演练系统；
- 2) 服务于战场指挥官的战场态势呈现与辅助决策的数字孪生系统；
- 3) 服务于战术训练的单兵或小队数字孪生训练系统。

（三）数字孪生战场参考架构

1. 参考架构

数字孪生战场作为数字孪生体应用的特定领域，其参考架构是数字孪生系统通用参考架构（图6）的实例化。

1) 总体运行框架

在数字孪生体的总体虚实关系方面，数字孪生战场的参考架构与通用参考架构保持一致。在军事领域，指挥官是不可或缺的组成部分，因此，目前还不存在数字孪生体向物理实体的数据传输关系，取而代之为指挥官的指令（图54）。

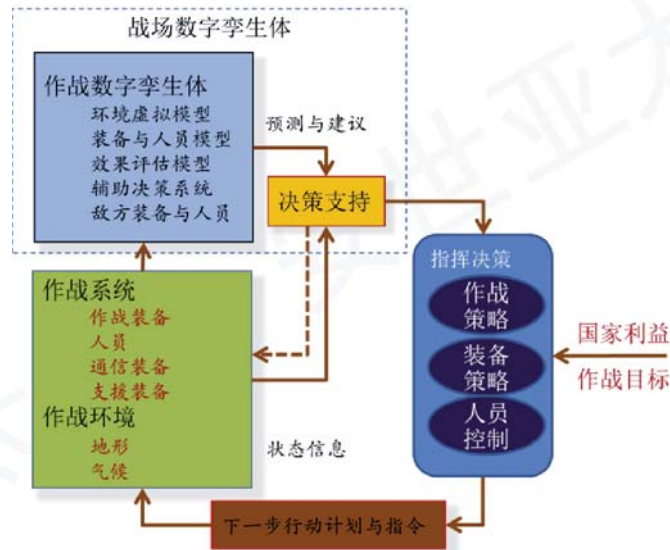


图 54 战场数字孪生体总体运行框架

2) 参考架构

从数字孪生体的建设应用，以及数据收集、传递、处理、应用的角度看，战场数字孪生体的参考架构如图 55 所示。

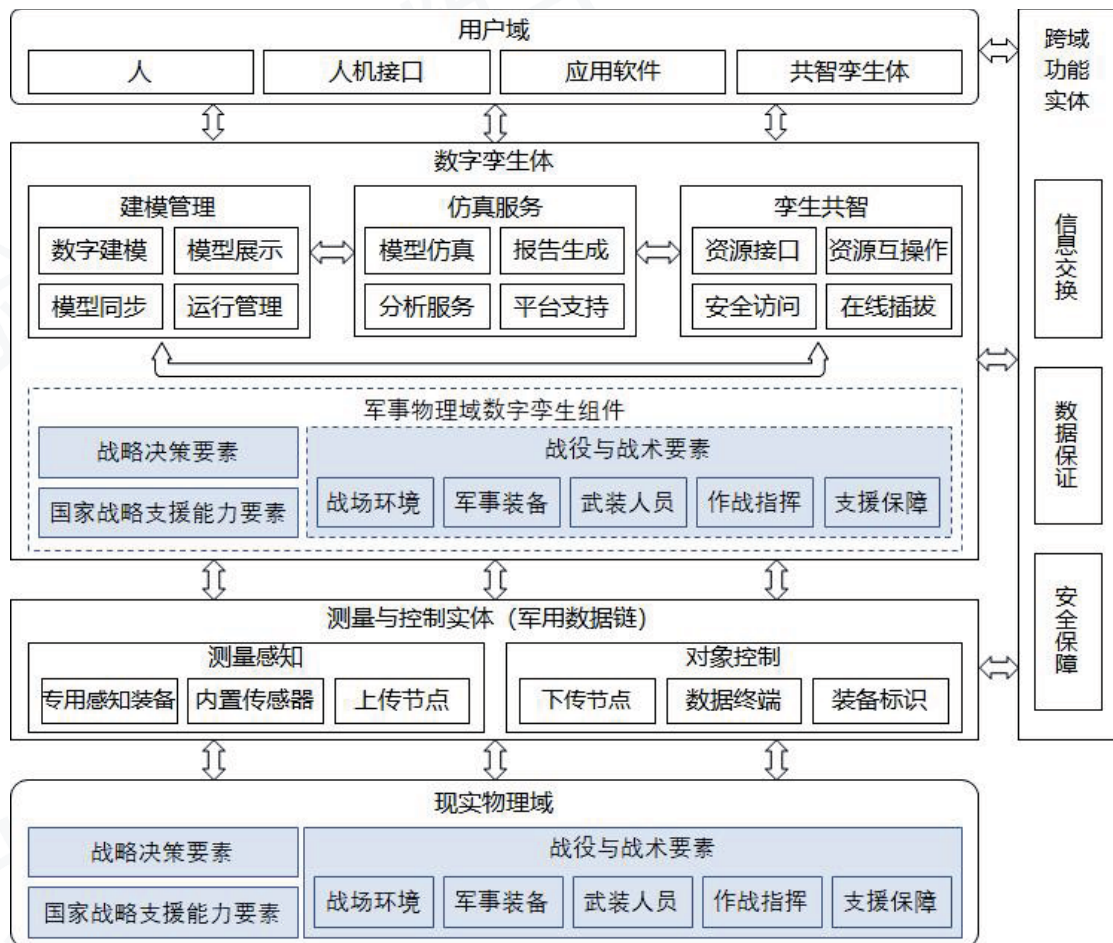


图 55 数字孪生战场的参考架构

对照数字孪生系统通用参考架构（图 6），数字孪生战场的参考架构与其不同之处主要体现在以下几个方面：

（1）现实物理域

在数字孪生战场参考架构中，现实物理域具体化为战场上可能出现的诸要素，主要是从国家层面看，军事斗争中所涉及的诸装备与人员的集合，尤其是战场中具体人和物，如作战飞机、航空母舰、潜艇、卫星、坦克等。

（2）测量与控制实体

在数字孪生战场参考架构中，测量与控制实体具体化为军用数据链层相关的装备和功能等，主要是服务于战场决策与指挥的数据收集、传递及管理功能部分，包括用于情报收集的感知装备、安装在武器系统或独立的数据收集终端、用于信息数据传递的中间节点以及信息数据表达规范等。

（3）数字孪生体

在数字孪生战场参考架构中，基于通用参考架构增加了军事物理域数字孪生组件，它们是与战场物理域内的诸要素一一对应的数字孪生组件。

2. 数字孪生战场的成熟度特征

按照前文数字孪生体成熟度模型，战场数字孪生体在各成熟等级上的标志和特征如下：

1) 数化

- 作战装备具有研发、维护、作战能力评估、抗毁伤能力评估等方面的数理模型，并加于应用；
- 作战人员总体表征性数据具有清晰的表述模型，并能够被指挥员获得应用；
- 战场环境建立了数理化模型，并能够加于实际应用；
- 敌方作战装备与人员具备基本数理模型；
- 国家后备支援能力具有数理化模型进行评估分析。

2) 互动

- 装备与人员携带有充分足够的传感器件和终端设备；
- 装备和人员的状态通过传感器能够实现到数字孪生体的传输；
- 作战装备数字孪生体能够正确反映对应作战装备的真实状态；

- 作战人员数字孪生体能够正确反映作战人员个体的真实状态;
- 指挥员的相关指令能够传达给战场装备与人员的同时,也在对应数字孪生体表达出来;
- 敌方作战装备与人员的真实状态能够及时反应到其数字孪生体上。

3) 先知

- 数字孪生体能够根据以前时刻的行动正确推演出下一时刻作战装备与人员的位置、状态;
- 敌方作战装备与人员可能的真实状态能够根据以前时刻的我方行动反应到其数字孪生体上,与战场的评估环节得到数据具有高度一致性;
- 战场环境的数字孪生体能够根据战场上的影响因素及以前时刻的数据推演出未来时刻的状态;
- 国家后备支援能力数字孪生体可以根据当前的数据推演出未来时刻可以参与战场作战的装备与人员;
- 国家综合态势数字孪生体能够根据当前数据推演出未来战争发生的方向和区域(即战役发生透明化)。

4) 先觉

- 战场数字孪生体及其所在系统能够根据当前及以前的数据推演出未来敌方可能采取的行动计划,并反映到敌方对应的数字孪生体上;
- 战场数字孪生体能够根据当前及以前的数据推演出我方最有利的下一步行动计划,并反映到我方对应的数字孪生体上;
- 国家后备支援能力数字孪生体可以根据当前的数据推演出当前国家后备支援能力应对未来战争的薄弱环节;
- 国家综合态势数字孪生体能够根据当前的数据推演出未来引起国家战略态势变化的重要事件发生的可能性(即战略可测)。

5) 共智

- 战场数字孪生体能够初步完成基本的战术选择与动作,达到数字孪生体与无人作战装备的高度一致性(即机机共智);
- 战场数字孪生体能够初步完成基本的战术选择与动作,达到数字孪生体与战场人员判断决策的高度一致性(即人机共智);
- 国家综合态势数字孪生体能够根据当前数据推演出未来国内外舆情、经

济等态势，并能够在未来得到高度一致性验证（即社会与机共智）。

- 战场指挥官功能弱化，不再需要关注战场中的细节。

（四）数字孪生战场的关键技术

数字孪生战场作为数字孪生体应用的特定领域，除通用数字孪生体一般所涉及的关键技术外，还有更多其所不涉及或不应用的技术，或需要进一步细化说明的技术等，主要包括：

1. 毁伤与损伤评估

无论是传统战争还是数字孪生战争，毁伤与战伤评估都是一个无法绕过去的话题。毁伤能力评估是指主动方的弹药能力与数量，可以通过一个简化的数理模型表达。武器毁伤效能评估是综合考虑战役战术目的、战场环境、火力力量、目标性质等因素，对实际毁伤效果进行综合分析和评定的过程，包括战斗部和目标的描述、毁伤情况的度量、武器战技指标对毁伤效果的影响、等效试验研究、建模与仿真等等。

损伤评估主要从装备应用和修理角度出发进行评估，由系统战伤评估和重要部件战伤评估两部分组成。一般损伤评估可以应用逻辑图、流程图或表格形式进行逻辑判断。

1981年，美联邦应急管理局建立了第一个损伤评估系统 Ready II，对武器对大数量装备群攻击结果进行了许多快速预测。同年，美国空军也组织开发了一个用于预测空军飞机的战伤和修理系统。1988年，海军武器中心和海军航空研究中心研究开发了用于预测飞机战伤的数据库，包含“指挥控制战中的战斗战伤评估模型”、“评估导弹攻击防御战中战斗战伤信息价值的概率模型”等。

近几十年来，美军相继成立了美国全军性战斗战伤数据分析中心、陆军战斗备件要求、装备性能与战伤数据系统、弹药效能联合技术协调组、联合实弹试验大纲、战斗装备的战损评估与修理、战斗数据信息中心等战伤研究评估机构和数据中心。当前，战伤评估以飞机最为典型。通常一般会编制飞机战伤评估与修复手册等规范，用于对评估进行定义和说明。常见的战伤评估方法包括：

1) 必要功能项分析（EFIA : Essential Function Item Analysis）

该方法从减少战场抢修的工作量入手，判断系统功能对于任务的重要度，以此来缩短修理时间。本方法只考虑影响飞机完成任务的必要功能组成部分，备用

项目、冗余系统皆不属于必要功能项。

2) 系统损坏模式及其影响性分析(DMEA : Damage Mode and Effect Analysis)

该方法假定武器攻击只造成一种系统损伤模式,并研究这种损伤模式对系统的局部和全局造成的影响,判断这种损伤模式的严酷度。该方法的基础数据的取得和方法验证最根本的途径就是通过战争的实践。目前,飞机战伤模拟成为取得飞机战损数据的重要途径,通过模拟预测飞机在预定敌对威胁下可能发生的战场损伤的系统、模式、规律、概率及其影响。

3) 系统损伤树分析(DTA: Damage Tree Analysis)

该方法借鉴可靠性分析中故障树分析法,建立了系统损伤树分析方法(DTA)。以损伤树为工具,寻找飞机系统的损伤模式与它的各个子系统或各个部附件的损伤模式之间的逻辑关系,分析造成系统损伤的各种途径。

4) 系统损伤定位分析(DLA: Damage Location Analysis)

该方法主要是通过定位查找损伤原因,常用方法包括建立损伤树和现场定位两种,其基本流程如图 56 所示。

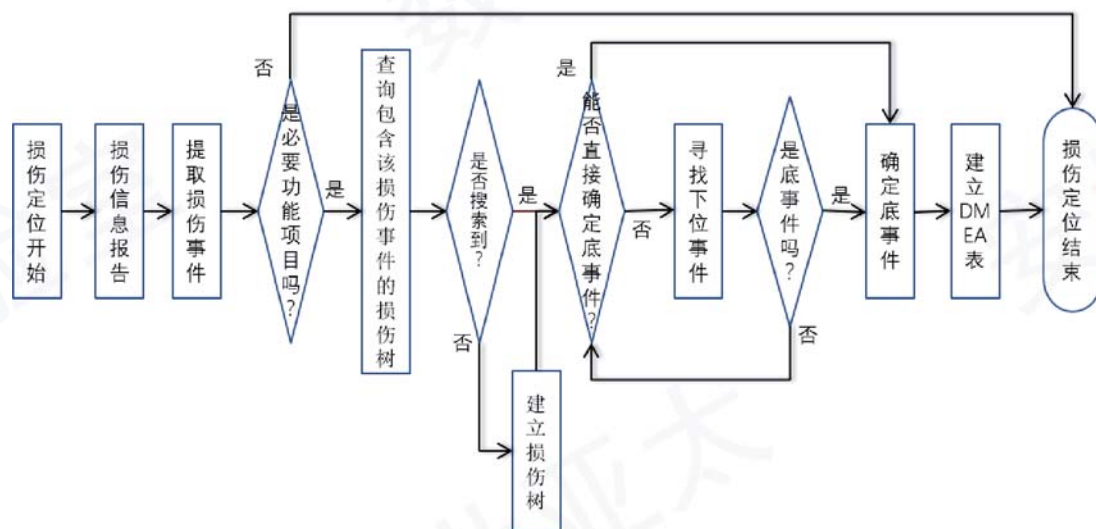


图 56 系统损伤定位分析的基本流程

5) 系统损伤修复方法及抢修资源分析(RMA/RRA: Repair Method and Repair Resource Analysis)

该方法主要针对损伤定位分析的结果,按其危害程度和战场环境条件,选择适合而有效的修复措施,并对修复时间进行估算。其目的是确定修复方法和修复顺序,进行抢修活动分解。进一步针对修复方法,确定战场环境中的抢修资源。

在数字孪生战争中,为更真实反应战争的真实状态,毁伤与损伤评估必不可

少,在战役级也应当包括战伤修复的内容。当前,损伤评估主要是依据装备(人员)的分解结构与其部位、部件的关键程度而进行评估。理想化的数字孪生体应当能够根据装备(人员)安装的传感器,正确向数字孪生体中反馈和反映毁伤与损伤数据。当这种损伤不能完全正确传输或感知时,建立正确可信的战伤评估模型就成为战场装备与人员数字孪生体建设的关键。

2. 军事辅助决策

军事辅助决策技术自古就有,象棋正是军事辅助决策技术演化的产物。运筹学、博弈论等学科也是从军事应用中逐渐产生和发展的。当代军事现代化不仅是武器装备的现代化,也是作战指挥决策方式的现代化。科学技术的快速发展以及在军事多领域的大量应用,使武器装备更趋智能化、信息化。指挥自动化系统和辅助决策支持系统成为一种重要的军事装备。

辅助决策支持系统是以管理科学、运筹学、控制论和行为科学为基础,以计算机技术、仿真技术和信息技术为手段,针对半结构化、非结构化的决策问题,支持决策活动的具有智能作用的人机系统。

军事指挥综合决策支持系统是辅助决策支持系统在军事指挥领域的应用。它以决策支持系统为基础,并采用其基本结构。军事指挥决策支持系统为指挥员提供科学、快速、有力的决策支持。

作为现代军事战争中一个重要组成部分和重要装备,将来无人装备发展的军事辅助决策系统会逐渐下沉、深化、细化,形成无人装备的一个重要组成部分,使无人装备具有一定的智能作战能力。在数字孪生战争中,军事辅助决策系统既会是军事装备的一个有机组成部分,也会是数字孪生战争的一个组成部分,为指挥官提供战场及各类信息。

3. 体系仿真

随着武器装备的复杂化,武器装备的研制、战略决策及战役战术指挥将日益复杂,借助于计算机信息技术进行模拟仿真成为必要的辅助手段。多兵种协同的体系化作战规模庞大,涉及要素多,将作战体系中所涉及的武器系统、作战环境、指挥控制系统等接入仿真虚拟环境构成体系对抗仿真系统,可以广泛用于对武器装备发展和应用验证。

近年,在国防部建模与仿真办公室组织下,美国建立了系列化、多层次的仿

真架构（表 5），有力支撑了武器装备体系的设计、试验验证和评估。

表 5 军用仿真体系分级

级别	功能	技术体制	技术手段	实时性	典型案例
战役级	评估典型威胁环境装备体系的作战效能	事件驱动	-	超实时	美国导弹防御计算机模拟作战系统；扩展防空试验床系统（EADTB）
任务级	测试评估装备体系完成使命任务的能力	事件/时间驱动	人在/硬件在回路	超实时	美国 GBI 分布式和集成地面测试体系
交战级	测试评估单目标环境下单装备作战模型的作战效能	时间驱动	人在/硬件在回路	实时	洛马 PAC3SIM 体系
工程级	测试验证单装备或部件的关键技术	时间驱动	硬件在回路	欠实时	美国 Eglin 空军基地红外试验体系

体系仿真技术包括的要素很多，但从军事应用角度讲，主要关注军事装备的建模与刻画问题，主要包括：

1) 复杂目标与环境建模仿真技术

复杂目标的仿真主要是研究目标特殊属性，如主动干扰源、弹头特征信号和复制诱饵目标等，主要是从机理出发，建立可信、可实现的复杂环境仿真模型库。环境建模的研究聚焦在综合自然环境数据、模型和仿真的互操作性、可信性与重用性上。

2) 高性能与可信度仿真技术

仿真可信度是完成高性能仿真的基础问题与重要指标。仿真失去可信度，装备体系仿真就毫无意义。仿真可信度评估的逻辑结构如图 57 所示。

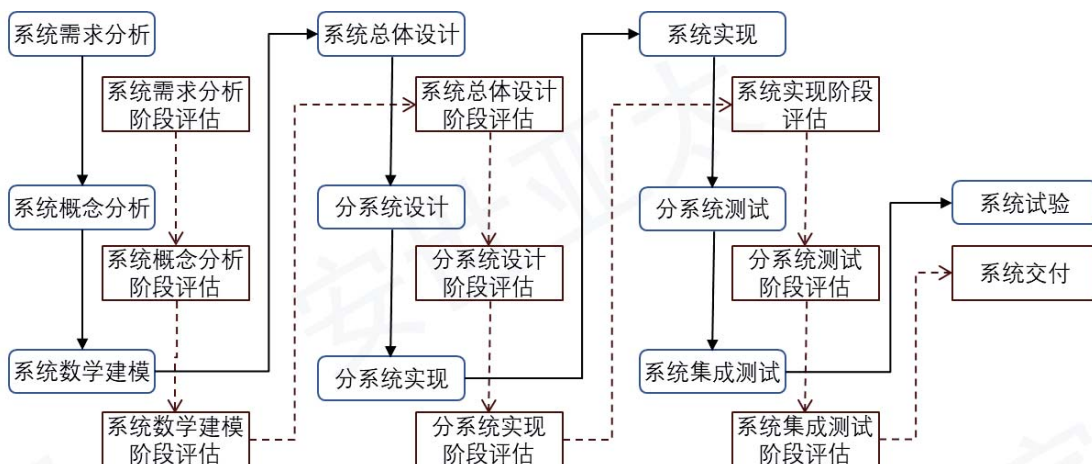


图 57 军用仿真系统可信度保障（来源：兵工自动化）

3) 基于大数据建模仿真

利用大数据相关技术为仿真建模与分析提供便利。当前，无论是武器装备数

字孪生体的联合作战，还是宏大场景的战场数字孪生体，体系仿真都是重要应用方向和方式。对战斗群作战实效的模拟和大型战场推演模拟，体系仿真都具有重要价值。通过效能预测和策略优化，为数字孪生体的“先知”特性提供支撑。

4. 军用数据链

军用数据链技术是在军事通信技术上发展起来的一种采用无线网络通信技术和应用协议实现武器平台之间的数据信息交换的网络系统技术，用以最大限度地发挥军用系统效能。它不仅能实现机载、陆基和舰载军用数据系统之间的数据信息交换，而且可构成点对点、一点对多点和网状的数据链路，使作战平台的计算机系统组成军用数据传输、交换和信息处理网络，为指挥员和战斗人员同时提供有关数据和完整的战场态势信息。

通过指挥、控制、通信、计算机、情报、监视和侦察（C4ISR）等系统，发达国家已经实现了军用数据链系统的综合集成，提高了武器装备作战效能。近年，美国防高级研究计划局又提出在 C4ISR 系统基础上增加杀伤，形成 C4KISR。当前军用数据链技术主要发展方向包括：

1) 研制、开发新一代数据链

在兼容现有装备的基础上，开发新的频率资源、提高数据传输速率、改进网络结构、增大系统容量、提高抗干扰、抗截获及数据分发能力，从军用数据链终端向联合信息分发系统演变，并在与各指挥控制系统及武器系统链接的同时实现与战略网的互联互通。

2) 多数据链协同

多数据链协同是指将某一数据链接收的数据，经过一定的格式处理后再发送到另一种数据链中，以此来提高数据的利用率，拓宽数据来源渠道。

3) 一体化数据链系统

现代军事斗争逐步发展为陆海空天一体化的作战模式。为适应这种变化，军用数据链也正借助于卫星通信及其他远距离传输信道形成一体化数据链系统。

在未来，数字孪生体技术的应用将逐步与当前军用信息系统融合并取而代之，形成一个基于战场应用和指挥的巨型信息化系统，在其上完成战场的数字孪生体。军用数据链的相关数据管理与处理功能有可能将与数字孪生体融合，形成其功能组成的一部分。

5. 战场感知

“知己知彼，百战不殆”，战场感知可以说自古就有。信息化的战场感知手段可以认为是从雷达的应用开始的。发展到目前，已经形成了各类卫星、侦察机、预警机、安装在各类飞机上的雷达、各个波段的地面防空/探测雷达、各类舰艇上的雷达/声纳、部署在各处的嗅探器、以及网络黑客等形形色色的信息感知手段与装备体系。当前，人工智能、信息栅格、移动网络、量子通信、云计算、物联网、大数据等新一代信息技术迅猛发展，为实现战场全维信息感知展示出广阔的应用前景。

美军先后开展了收集战场信息的“智能微尘”系统、远程监视战场环境的“伦巴斯”系统、侦听武器平台运动的“沙地直线”、专门侦收电磁信号的“狼群”系统等一系列传感系统的研究与应用，把指挥控制系统、战略预警系统、战场传感系统、战备执勤监控系统、装备物资管理可视化系统等资源整合起来，构建集中统一的战场传感网络体系，实现战场实体基础设施与信息基础设施互联互通互通的目标。

从战场感知装备与技术应用角度分类看，主要包括以下几个类型：

1) 主要服务于陆军在战场部署的自主传感器和机器人

这类装备主要包括小型无人机(图 58)、无人车、小型无源雷达等，主要是用于收集小范围内的敌方无线电信号、装备、人员、地形信息，通过部署于附近的信息节点进行数据处理和上传。



图 58 小型无人机在战场上的应用(来源:军事文摘)

2) 主要服务于空军、海军的预警机、侦察机

这类装备已经形成一个区域化的信息收集、处理、传输和控制中心，是军用

数据链中的关键节点、数据处理中心、收集与分发中心,在当前的现代化战争中往往扮演着指挥中心的角色。

3) 主要服务于战略决策的各类侦察卫星、通信卫星、GPS等

这类装备一般都服务于战略层面,用于日常信息收集,并可以民用,不局限于军事用途。

4) 主要服务于防空与作战的地面/舰艇/机载雷达

这类雷达与武器装备作战系统密切集成,成为其一个组成部分。它们也是战场感知系统中的重要组成部分,其获得的信息与数据可以直接通过人工或其它处理方式,形成火力单元的作战指令参数,同时也将获得的信息数据上传共享,供其它系统使用。

5) 网络黑客

黑客通过网络获取信息也成为信息与数据收集的重要手段,甚至成为战争中至关重要的一种手段。

数字孪生体的基础是数据,感知技术装备是数据的最重要来源。信息数据的充分、准确、及时是数据孪生体实现与运作的基石。在非军事领域领域,数据充分、准确、可信是基本假定。但在军事领域,数字孪生体所基于的数据,尤其是敌方数据一定是不充分、甚至不可信的。数据的准确性和可信度高度依赖于感知能力。在数字孪生体逐渐建立和完善的同时,战场感知技术将与数字孪生体逐渐融合和紧密集成。

(五) 数字孪生战场的典型应用场景

1. 单兵(装备)作战

(1) 背景

传统的单兵(装备)与小队战术训练的战场环境要素与装备应用要素明显不能满足实战需要,迫使某些国家采用战术类游戏来进行单兵或小队的战术训练。但这些游戏本来以娱乐为目的,所以许多模型做了过分降阶处理,存在相当大的失真。游戏中的地形也与实际战场地形完全不同,不能得到实际单兵战术训练的效果。

(2) 方案

为了满足单兵与小队战术训练需求,以及装备发展与应用维护需要,在单兵

(装备)作战方面,利用数字孪生体技术可以形成两类系统:小队特种作战训练系统和装备数字孪生体。

1) 小队特种作战训练系统



图 59 双人驾驶飞机模拟器(来源:《Cyber Vision 2025》)

小队特种作战训练系统是指主要用于单兵(装备)、作战小队进行战术作战训练的数字孪生系统,如城市战训练系统、丛林战训练系统、单机训练模拟器(图 59)等。根据用途对象不同,这类系统中数字孪生体的内容、对象和方法也不同。例如从对象来看,通常有地形/地理环境、天气/气候环境等的数字孪生体。

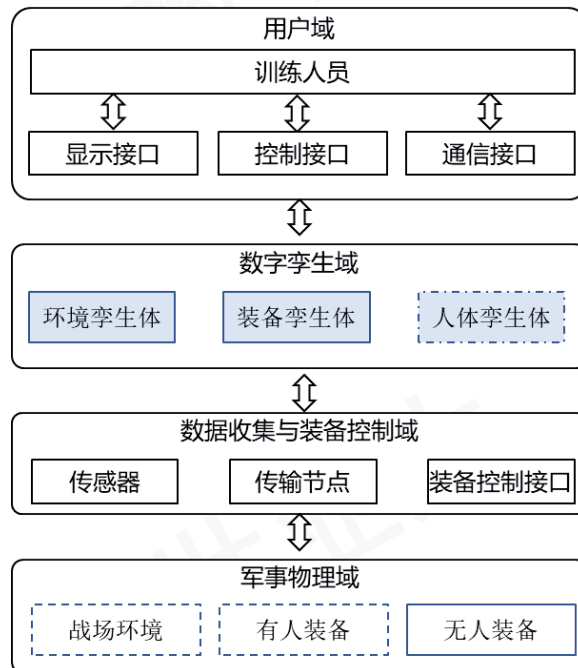


图 60 小队特种作战训练系统运转与功能逻辑架构

在小队特种作战训练系统中,训练的主要对象是人。人本身就是物理世界的一部分,需要建立数字孪生体。小队特种作战训练系统的整体运转与功能逻辑如图 60 所示。作战人员通过人机接口控制数字孪生体进行运转,从而达到战术训练的目的。对于无人装备甚至可以通过军用数据链等实现对无人装备的实际控制,

完成实际作战。

用于研究装备发展时,小队特种作战训练系统中的数字孪生装备要比训练用的数字孪生体考虑更多装备细节,其建设复杂度将有所增加。

小队特种作战训练系统完成战场环境、作战装备及人员的数字化建模即可,而不需要建立完备的装备控制系统来做虚实交互。因为有人在环,人作为一个物理实体的同时,实际上也可完成虚实之间的交互任务。

2) 装备数字孪生体

装备数字孪生体的主要目的和任务不是战术训练,而是装备的使用、保障及寿命预测。主要是对装备各有效组成部分建立数字孪生体。这部分参见数字孪生制造相关章节,此处不详细展开。

(3) 效益

通过上述两大类系统的建设,可以解决当前单兵(装备)及小队训练中的系统问题,用于加强单兵与小队战术训练、新装备的验证与研究等。通过装备数字孪生体可以进行预测性维护,有效延长装备寿命,降低相关费用,增强军事力量。

2. 多兵种战役

(1) 背景

当前,从军事斗争角度讲,多兵种协同作战已经是战争的主要样式。但多兵种协同作战训练还难以在日常训练中展开,往往要通过多兵种联合演习来完成,浪费大量的人力、物力,而且不能重复和优化。从作战训练系统讲,当前还多处于各军兵种独立应用的状态,对其它兵种的描绘和应用力度不够,训练效果大打折扣,实际上限制了多兵种协同作战能力和装备的发展。

(2) 方案

在多兵种协同战役的角度看,数字孪生体技术的应用包括:

1) 战役体系对抗演练系统

战役体系对抗演练系统主要解决多兵种协同训练问题。主要是依据作战想定中给定的条件,完成战场地形、战场气候、战场态势、战场装备、战场人员,以及信息支援、战场维保等因素的数字孪生体模型建设。整个战役体系对抗演练系统运转与功能逻辑架构如图 61 所示。

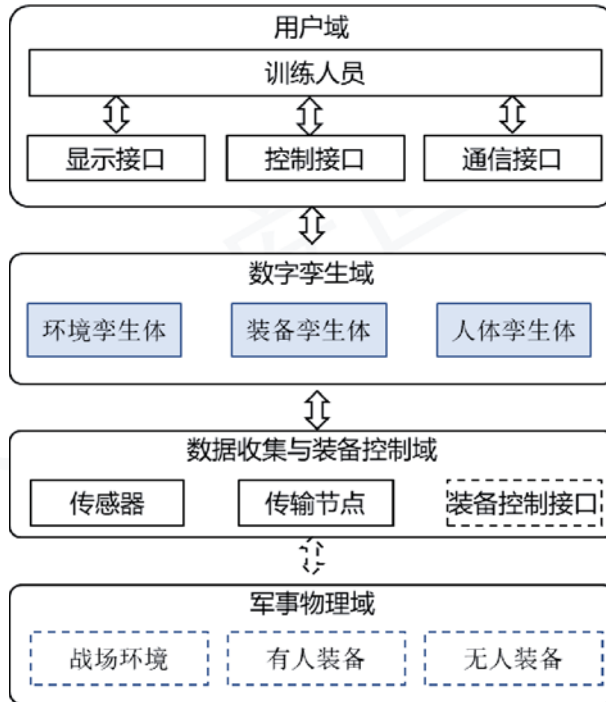


图 61 战役体系对抗演练系统运转与功能逻辑架构

由于以训练为目的，战役体系对抗演练系统与实际物理实体是完全分离的，在其建设中只是应用数字孪生体技术对战役中的相关要素进行数字化建模。

2) 战场态势综合显示系统

战场态势综合显示系统主要是针对战争中指挥员的辅助决策与战场态势呈现而建，可以理解为当前指挥作战系统的进化版本，也可以认为是数字孪生战争系统。整个系统的运转与功能逻辑架构如图 62 所示。

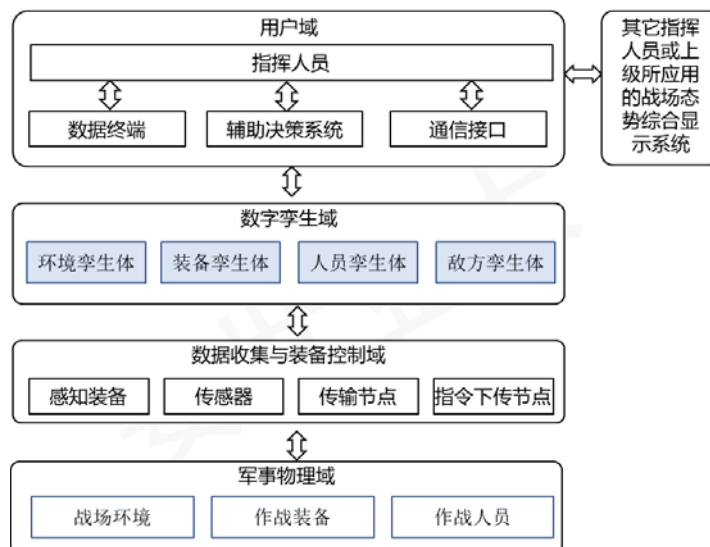


图 62 战场态势综合显示系统运转与功能架构图

在一定程度上讲，战场态势综合显示系统基本实现了数字孪生状态下的战争。借助于众多感知装备和传感器，以战前收集的敌方装备、部署信息、我方的战场部署和指挥信息、战场收集与反馈的敌我双方的装备信息、战场环境信息等为基

础,应用数字孪生技术和方法,对战场环境、装备与人员部署、战场态势、战场指挥员命令、装备与人员损伤等数据纳入数字孪生体,使战场态势真实有效地呈现在指挥员面前。其中的辅助决策系统为指挥员提供决策与指挥帮助,指挥人员的决策在下达到相关的作战单元的同时,也会所反映到相应的数字孪生体上,实现物理实体与数字孪生体的同步和一致。同时应用军用数据链等功能完成与上级、下级和同级指挥员的信息沟通和一致。

在战场态势综合显示系统中,各类数字孪生体是对战场上物理实体的数字化;通过军用数据链等完成了虚实体间的交互;在辅助决策系统中应用数字孪生体推演也基本实现了先知甚至先觉。

(3) 效益

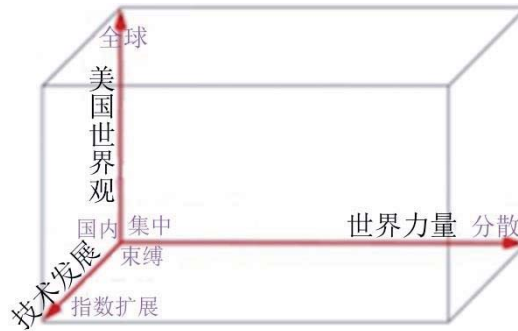
解决当前多兵种协同训练问题,形成低成本的协同训练方式和环境,强化训练频次与效果,优化战争中的兵种、装备配置,优化战役、战术方针,为装备研发提出需求,为装备发展方向的提供依据。依赖战场态势综合显示系统可基本实现基于数字孪生的战争,使战争的当前态势显性化、未来发展趋势显性化,可广泛应用于战略与战役等层面的决策与指挥。

3. 战略决策

(1) 背景

战略决策是一个政治、经济、军事等诸要素综合分析判断的结果。当前,基于政治、经济等影响因素的复杂性,战略决策过程还多是基于头脑风暴与沙盘的推演过程,如在美国空军 2025 和美国空军战略研究 2020-2030 中进行的世界未来发展未来态势的假设和推演,及辅助形成空军的战略决策。未来可以基于数字孪生体技术建立国家战略态势分析系统,来进行国家级经济政治发展推演和军事行动与支援推演,从而辅助领袖形成战略决策。

传统的战略决策场景方式是,将国家和区域发展的可能性和态势简化为若干变量,然后进行人工推演。图 63 为美国空军 2025 中应用的变量及推演结论。



序号	美国世界观	技术发展	世界力量	名称
1	全球	指数扩展	分散	Digital Cacophony
2	全球	指数扩展	集中	Star Trek
3	全球	束缚	分散	Gulliver's Travails
4	全球	束缚	集中	Pax American
5	国内	指数扩展	分散	Byte!
6	国内	指数扩展	集中	Zaibastu
7	国内	束缚	分散	Hooverville
8	国内	束缚	集中	King Khan

图 63 国际政治态势发展推演（来源：《Air Force 2025》）

(2) 方案

在战略决策层面，应用数字孪生体技术可以形成几个不同侧面的巨型系统，如战略体系对抗演练系统、国家战略态势分析系统、国家战争综合支援能力分析系统、战略体系对抗演练系统等。

1) 战略体系对抗演练系统

战略体系对抗演练系统是：假定国家陷入长期战争状态时的战争过程分析推演系统。从功能上可以认为是战役体系对抗演练系统的升级和加强，对其扩展了国家对战争的支援过程和能力要素。在此不再赘述。

2) 国家战略态势分析系统

国家战略态势分析系统主要是对国家经济发展态势、技术发展态势等要素进行建模形成数字孪生体。通过数字孪生体模拟运转，分析与推演未来国家与其它某个国家或若干国家发生冲突和战争的可能性等。国家战略态势分析系统的运转与功能框架如图 64 所示。

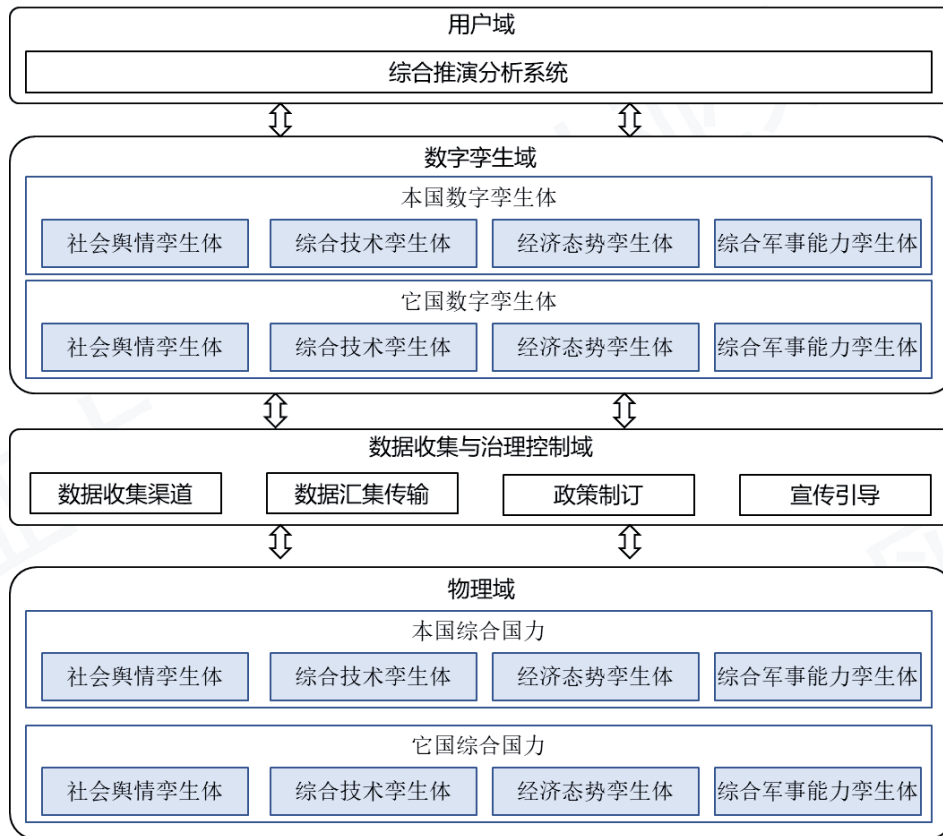


图 64 国家战略态势分析系统的运转与功能框架

与上面涉及的其他系统不同，国家战略态势分析系统所涉及的要素是国家宏观要素，如整个国家舆情、经济形势等。这些要素的数据也是统计值、局部值和侧面值，基于此建立的数字孪生体近似性较差。从数字化建模角度上讲，该孪生体模型比其他系统中的孪生体模型要简化的多，置信度较低。另外，虚体与实体间的数据交互渠道也不再是某个具体设备，而是体现为国家政策、宣传引导等诸多手段，数据传输效果大打折扣。信息和数据真正抵达受众的时间也会延迟，不具有实时性。这正是国家战略态势分析系统建设的复杂之处。

3) 国家战争综合支援能力分析系统

国家战争综合支援能力分析系统是对整个国家地理与地形、交通运输网络、行业生产能力与布局、国防动员能力等要素进行建模生成的数字孪生体。主要用于分析国家在战争状态下的综合战争支援能力和潜力等，服务于国家战略部署与战略支撑点的选择与建设。

其数字孪生体建模与分析的粒度介于国家战略态势分析系统与其他孪生系统之间，既有相对完整的物理世界的孪生体，如国家路网等，也有粗粒度的孪生体，如行业生产能力等。从总体上讲，国家战争综合支援能力分析系统结果置信

度是比较高的,因其基础数据和依据相对具有可测性。交互方面依旧需要通过政策、制度及工程项目完成,整体建设复杂度也相当高。

(3) 效益

针对当前只能用人工推演和头脑风暴等低效方式来分析与论证国家战略问题的现状,通过上述三个系统,应用数字孪生体技术可以使国家战略决策部署有理论与数据的支撑,并可以通过政策、宣传、项目等手段来牵引社会行动,完成优化、决策和行动循环。

(六) 数字孪生战场的典型应用案例

从目前的公开报道看,数字孪生战场还基本处于空白状态。本节主要就当前已有基础,讨论对应场景下的数字孪生体实现方法和技术路径。

1. 单兵与作战小队特种作战训练系统

(1) 问题与蓝图

单兵与作战小队的数字孪生体可以说是最简单的一种作战形式。虽然,当前多兵种协同是战争的主流,但以陆军为主的有限目标的特种作战依然不可或缺。单兵或小队作战一般以城市战、丛林战等其它兵种严重受地形限制的区域为重点,受部队驻地、城市正常运转等因素的影响,这种特种作战样式的训练受到较大限制。迫于无奈,有些国家应用游戏作为特种作战训练系统。

在数字孪生体及其它技术日益成熟的当下,依据实际状态对环境和装备建立数字孪生体,形成单兵与作战小队特种作战训练系统是一个逐渐走近的解决方案。

(2) 特种作战训练系统整体解决方案

在所有战斗要素中,人是最具有能动性的要素。如果剔除人的要素,有直接变成电影的可能。因此,单兵或作战小队特种作战训练系统以有人在环为主要模式。目前,以CS(半条命)、PUBG(绝地求生)等为代表的若干款游戏基本实现了上述要件,尤其是战场环境的数字孪生体。

1) 战场环境要素

a) 建筑物

在一般的三维游戏中,数字孪生战场基本实现了类似数字孪生城市中的简单建筑外形、内部空间布局,以及部分物体的数字孪生体。在游戏开发过程中,建筑物及物品一般应用三维工具定义建筑物等实体,它与CAD工具软件定义的物

体具有基本相同的性质,随着人物在游戏中的移动,可以实现变换、遮蔽等效果。

(图 65)



图 65 战场环境的数字孪生体(来源:网络)

在数字孪生体层面上看,特种作战训练系统中的建筑物可以应用与数字孪生城市相同或相近的技术进行建筑物的刻画与表达,并从标准上走向融合和一致。

b) 自然物(地形、树木等)

在当前 3D 或 2.5D 游戏中,自然物生成基本采用了与建筑物相同的技术,与真实的地形无关。

在数字孪生体层面,自然物的刻画可以采用当前已经基本成熟的 GIS 技术,完全采用真实的战场地形环境。对于树木等自然物也可以采用相应的工具进行完整的信息刻画。

c) 气候与天气

在目前的各种游戏中,这个要素表达为其影响的要素,如光线明暗、道路通行等因素。

在数字孪生体中,可以利用当地气候与天气大数据,建立与训练地区相似的气候与天气模型,通过建立相应的数理模型对其影响进行表达。

2) 作战装备要素

在特种作战训练系统中,作战装备要素表达总体上可以采用降阶简化的产品数字孪生体模型进行表达。主要考虑的因素包括:

a) 外形与操作方式

在上述两款游戏中,主要通过贴图的方式及游戏引擎的限制,表达了装备的外形要素。

在特种作战训练系统中,表达为几何实体对象数字孪生体模型。

b) 重量与后座力

在上述两款游戏中，重量与装备后座力基本忽略了。

在特种装备训练系统中，通过装备数字孪生体所带有的重量与后座力数据，结合人的力量与位置模型综合实现相关要素与影响的表达。

c) 可靠性

在上述两款游戏中，对于装备可靠性与寿命没有考虑。

在特种装备训练系统中，通过装备数字孪生体，利用其中的数理模型实现可靠性与寿命预测。

3) 人体

在上述两款游戏中，人体基本采用贴图方式实现。通过键的组合基本实现了游戏人物的动作模拟。

在特种装备训练系统中，以训练本人的身体基本数据为主要依据，以人身模型数据库及人体模型建立实体化的人体数字孪生体，并进一步代入力量等因素。

4) 毁伤等其它要素

a) 弹药

在上述两款游戏中，装备弹药相关的因素有所考虑，主要表现为杀伤程度与范围，其它因素忽略。

在特种装备训练系统中，应用弹药数字孪生体，充分考虑计算弹药的毁伤能力。结合敌方属性和毁伤模型综合计算相关毁伤效果。具体毁伤模型，可考虑人体部位与伤害程度，进一步建立人体结构模型，用人体器官组织的伤害来决定受伤程度。

b) 弹道

在上述两款游戏中，弹道基本上没考虑，尤其是弹道受天气等因素的影响问题完全没有考虑。

在特种装备训练系统中，通过装备数字孪生体与天气数字孪生体综合计算弹道。

(3) 价值分析

当前，上述两款游戏已经被某些国家用来训练士兵，主要是因为特种装备训练系统缺乏。这也表明，以数字孪生体技术为基础支撑的特种装备训练系统具有极大价值。尤其与智慧城市的建筑数字孪生体技术相结合，完全可以建立与真实世界基本相同的作战环境。结合装备数字孪生体能够更加准确描述装备的各类特

性，从而搭建真正表达现实世界的战场数字化孪生环境。

该特种作战训练系统可广泛用于训练士兵战术素养，提升士兵的战术素质；可用于进行作战小队训练，提升士兵间的协同作战能力。可以试验和验证城市作战战术，也可用于验证新型装备的作战效能，协助单兵武器的发展等。

2. 航母战斗群体系对抗演练系统

(1) 问题与蓝图

自二战以来，航母战斗群一直在战争中扮演着重要角色，尤其是上世纪后期至今发生的几场局部战争中，航母起到了至关重要的作用。拥有航母与否、拥有的数量成为评价一个国家军事能力的重要标志性因素。

同时，航空母舰战斗群又是一个极其复杂的系统工程。一方面其携带的武器装备品种繁多，自成体系。另一方面，当前世界处于一个相对和平的时期，我国也一直主张“和平共处”的理念，我国航母将在相当长的时间内不会参加实战，相关人员的经验极不容易取得，这决定了我国航母战斗群的成熟要有一个相当长的时间。

在数字孪生体技术日益成熟的当下，充分利用信息化技术构建航空母舰战斗群数字孪生体，并用之形成一个体系对抗演练平台，进行虚拟的航母对抗演习与训练，可以解决航母没有实战环境的问题。同时也可以形成一个航母战斗群训练实时跟踪、监控系统，利用数字孪生体衍生的新实例可以对航母训练进行实时优化，从而提升航母战斗群的训练效果。

航母战斗群的作战样式主要包括：

1) 对空

对抗飞机群——包括战斗机、轰炸机混合机群对航母战斗群的攻击。主要是利用舰载飞机和舰载防空导弹与敌方战斗机进行制空权的争夺。

对抗导弹群饱和性攻击，主要是充分利用舰载战斗机、舰载防空导弹对来袭导弹进行击落，利用航母的机动能力进行战术规避。

2) 对海

充分应用航母战斗群携带的反潜飞机、雷达、声纳等设备，预先发现敌人，预先构成攻击要件并制胜。利用舰载导弹、水雷、战斗机等击落潜射导弹和鱼雷等攻击武器。利用航母本身的机动能力进行规避。

进行航母战斗群间的对抗,包括一对一、一对二、二对二、二对一、多对多等样式。

3) 对陆

充分利用舰载的战斗机、导弹等对陆地特定目标的攻击。

由上可见,着眼于航母对抗训练的数字孪生体的要素至少应包括:航母战斗群的各组成部分、主要舰艇类型、陆基的各型飞机/导弹和防空设施,以及隐于航母战斗群之后的军用数据链、指挥系统等。

(2) 航母战斗群体系对抗演练系统解决方案

基于航空母舰战斗群的作战研究,科索沃战争最接近于航空母舰战斗群对陆地攻击样式。下面以该战争为例,研究航空母舰战斗群的数字孪生体的建设与应用。不过,限于科索沃战争本身的样式及我们对其的理解,数字孪生体相关要素并不齐全和足用。

1) 案例背景与基本场景

科索沃战争是上世纪末发生的一次以强对弱战争,时间是1999年3月24日至6月20日。主要参战装备包括:北约有B-2隐形战略轰炸机、F-111超音速战斗轰炸机、F-117A隐形战斗机、B-1B轰炸机、B-52战略轰炸机、F-16战斗机、AV-8B垂直短距起降攻击机、狂风战斗机、“幻影”2000战斗机、“美洲虎”式攻击机、“企业”号等三艘航空母舰、“战斧”式巡航导弹等;南斯拉夫方有高射炮兵、苏制萨姆-3地空导弹、“毒刺”肩扛式防空导弹、米格-29战斗机等;隐在战场之后不可见卫星、作战指挥系统等。

2) 战场环境

在真实的科索沃战争中,战场环境的数字孪生体是否已经应用,目前并不得而知。

在航母战斗群体系对抗演练系统中,可以考虑应用城市数字孪生体技术,如地理信息系统(GIS)、建筑信息系统(BIM)等相关技术,建立科索沃战域——南斯拉夫及亚德里亚海的地形及建筑,形成数字孪生体,包括:地形、海况、建筑、军事设施等,尤其是具有战略意义的军用设施、铁路、桥梁、医院、油库、广播电视台等。

3) 飞机

在航母战斗群体系对抗演练系统中,飞机数字孪生体可以用通用的军用飞机

数字孪生体模型,通过增加其个性化要素来表达。飞机数字孪生体的运动模型可以考虑应用质点运动方程(或六自由度刚体运动方程)建立飞机运动模型。飞机控制要素考虑包括驾驶杆输入、舵输入、油门杆输入、投弹按钮等。战伤模型采用统一化的战伤模型。

飞机具体型号个性化的因素包括:具体型号的气动参数数据或性能数据,用于支撑飞机孪生体的运动模型;具体型号外形数据,用于衍生具体型号的实例化数字孪生体;外挂配置方案,用于建立与其它数字孪生体的关系等。

具体型号数据包括: B-2、F-111、F-117A、B-1B、B-52、F-16、AV-8B、狂风、“幻影”2000、“美洲虎”、米格-29、无人机。

4) 航空母舰

在航母战斗群体系对抗演练系统中,航母数字孪生体可以考虑以船体数字孪生体为核心,结合动力数据建立航母运动模型。舾装等部件可以考虑简化。通过个性化要素衍生出具体型号的数字孪生体。主要考虑因素包括:甲板长度等外形参数,用于建立具体型号的外型与其它约束模型;动力数据,用于通过运动模型数据来计算航母的机动能力;配置方案,用于与飞机数字孪生体、导弹数字孪生体等进行关联;指挥装备要素等。

具体型号包括:企业号等。

5) 其它舰艇

与上述航母数字孪生体建设思路相同,通过通用数字孪生体衍生具体型号模型。

6) 弹药

弹药数字孪生体,考虑到不同弹差异较大,弹药数字孪生体以弹种为限,分别建立不同弹种的数字孪生体。根据具体型号进行个性化数字孪生体的衍生。个性化要素主要考虑:适用载体、射程、精度、杀伤半径等要素。

具体型号包括:GPS制导的巡航导弹、激光制导炸弹和联合直接攻击弹药等。

7) 地空导弹系统

在航母战斗群体系对抗演练系统中,地空导弹数字孪生体实际也是一个数字孪生体联合系统,需要分别建立雷达系统数字孪生体、导弹发射车和弹体数字孪生体。在通用数字孪生体的基础依据具体型号进行个性化的数字孪生体衍生。主要考虑因素包括:射程、射击精度、杀伤半径、备弹数量等。

具体型号包括：苏制萨姆-3 地空导弹。

8) 防空火炮

在航母战斗群体系对抗演练系统中，防空火炮数字孪生体与地空导弹有部分相似，需要分解为雷达与火炮两部分。个性化因素主要考虑射程、射击精度、杀伤性能等。

9) 特种飞机

特种飞机包括：预警机、电子干扰机等。在航母战斗群体系对抗演练系统中，对于特种飞机可以采用通用的飞机数字孪生体，结合个性化进行衍生，并增加特种飞机的部件体，如雷达罩等。在特种机型数字孪生体上根据个性化要素进一步衍生形成具体型号。个性化因素需提前建立相应的数理模型，包括：如预警机的探测半径和信息传输能力模型、电子干扰机的电磁压制能力模型等。

10) 其它装备

其它装备，如“毒刺”肩扛式防空导弹等，按具体装备建立具体化的数字孪生体。在此不详述。

11) 军用数据链

在本案例中，主要考虑因素信息传输能力、保障能力等要素。

(3) 价值分析

上述以科索沃战争中所涉及诸装备、要素为原型讨论了基于数字孪生体技术建立航母战斗群体系对抗演练系统的基本技术解决方案，实际上一个航母编队所涉及和所要面对的装备和要素还要更复杂。在前文中，已经提到时航母战斗群的主要基本作战样式，从航线作战与训练角度出发，要建立一个完善的航母战斗群体系对抗演练系统可能是一个不断补充完善的长期过程。

通过航母战斗群体系对抗演练系统的建设，能够在如下方面取得收益：

1) 进行航母战斗群与不同敌手的对抗演练分析，发现和补充航母战斗群的不足，为进一步的装备发展提供帮助和依据；

2) 通过航母战斗群与不同敌手的对抗演练分析，建立、补充和完善航母战斗群战术和技术方法；

3) 通过航母战斗群与不同敌手的对抗演练分析，训练指挥人员的协同作战能力和水平。

九、数字孪生体标准化进展

“如无必要、勿增实体”，这句 14 世纪逻辑学家威廉提出的“奥卡姆剃刀定律”，生动形象地点明了标准化工作的目的和本质：简化（人类生产生活中）不断增长的复杂性。而数字孪生体是为了消除各种系统、特别是复杂系统的不确定性，通过数字化和模型化，用信息换能量，以更少的能量来消除不确定性。两者殊途同归、异曲同工。而数字孪生体本身的标准化工作，近两年，无论是国际、还是国内，都从智能制造的场景出发，紧锣密鼓地启动。

（一）标准化相关活动

2018 年，美国工业互联网联盟（IIC）成立“数字孪生体互操作性”任务组，探讨数字孪生体互操作性的需求及解决方案，重构与德国工业 4.0 的合作任务组，探讨数字孪生体与管理壳在技术和应用场景方面的异同，以及管理壳在支持数字孪生体的适用性和可行性。

2019 年初，ISO/TC 184 成立数字孪生体数据架构特别工作组，负责定义数字孪生体术语体系和制定数字孪生体数据架构标准。

2019 年 3 月，IEEE 标准化协会设立 P2806 “工厂环境下物理对象数字化表征的系统架构”工作组，简称数字化表征工作组，探讨智能制造领域工厂和车间范围内的数字孪生体标准化。

2019 年 5 月，ISO/IEC 信息技术标准化联合技术委员会（ISO/IEC JTC 1）第 34 届全会采纳中、韩、美等成员代表的建议，决定成立数字孪生咨询组，并发布《数字孪生体技术趋势报告》。首批咨询组成员来自中、澳、加、法、德、意、韩、英、美等国，中国电子技术标准化研究院（简称电子四院）专家韦莎博士担任该咨询组召集人。该咨询组工作范围与主要职责包括：梳理数字孪生的术语、定义以及标准化需求；研究数字孪生相关技术、参考模型；评估开展数字孪生领域标准化的可行性并向 JTC 1 提出相关建议等。

2019 年 7 月，由 ISO/TC184（工业自动化系统与集成）与 IEC/TC65（工业测控和自动化）联合成立的 ISO/IEC/JWG21 “智能制造参考模型”工作组第 8 次会议在首尔召开。此次会上，成立了“TF8 数字孪生资产管理壳”任务组。本次会议上，专家进一步明确了该任务组的职责：面对“资产管理壳”、“数字孪生体”、“数字线程”等概念丛生的现象，抓取核心发展脉络，梳理数字孪生与智能制造

参考模型之间的潜在关系。后续 TF8 可能会发展成为一个新的 ISO 和 IEC 的联合工作组。

2019 年 11 月 3 日, ISO/IEC JTC 1 AG 11 数字孪生咨询组第一次面对面会议在新德里召开。各国代表围绕数字孪生关键技术、典型案例模板等进行了交流,并重点讨论了 AG 11 数字孪生咨询组中期研究报告。

2019 年 11 月,北京航空航天大学联合电子四院、机械工业仪器仪表综合技术经济研究所等国内 12 家单位联合发表《数字孪生标准体系探究》,提出数字孪生标准体系框架和结构。

2019 年 12 月,本白皮书发布,提出了数字孪生体的概念模型、数字孪生系统的通用参考架构以及若干场景的顶层参考架构、数字孪生体应用场景扩展的参考框架、数字孪生体的成熟度模型,为数字孪生体实验室积极参与国际、国内相关标准化工作打下了坚实的基础。

(二) 相关标准研发进展

目前正在制定的与数字孪生体直接相关的国际标准有两个:

1、ISO/TC184/SC4 WG 15 (数字化制造工作组)负责的 ISO 23247 (数字孪生体制造框架)。目前处于国际标准草案阶段,预计明年正式成为国际标准。ISO/DIS 23247 包括四个部分:概述和基本原理、参考架构、物理制造元素的数字化表达和信息交换;

2、ISO/TC184/SC4 JWG 16 (产品数据可视化工作组)负责的 ISO TR 24464 (数字孪生体可视化组件),目前处于工作组草案阶段。

随着各标准化组织相关工作组工作的开展,2020 年将迎来数字孪生体相关标准制定的攻坚年。

十、结论

本白皮书在吸收了全球在数字孪生体领域最新研究成果的基础上,做了一定创新和发展。我们在数字孪生体参考模型以及标准建设等方面,紧跟国际权威机构的研究成果。在大框架上不特立独行,但在国际空白领域、尚无定论环节和具体应用方案上大胆创新和创造。

首先,不仅限于当前研究较多的工业(或制造业)和城市领域,在产业和军事领域,数字孪生体也将大有可为。所以,作为数字孪生体的通用白皮书,对实例化应用的抽象和总结是首要任务,其次还要回归到更大范围的实践中。

其次,以往的数字孪生体研究过于偏重于数字化,更像是数字化技术的微小升级。其实就数字化而言,在 PLM、虚拟城市、战场仿真、工业大数据等方面都已经有很成熟的研究成果,应用也较为成功。所以,我们将数字孪生体的研究视角提升到“互动”和“共智”层面,强调虚实动态实时互动,以及相关数字孪生体的共同进化。这才是数字孪生体区别于过往研究的重点所在,也是该体系价值最大的领域。

再次,我们提出“数字孪生体是仿真应用新巅峰”这一论断:“数化”的核心技术——建模总是和仿真联系在一起,或是仿真的一部分;“互动”是半实物仿真中司空见惯的场景;“先知”的核心技术本身就是仿真;有很多学者将“先觉”中的核心技术——工业大数据视为一种新的仿真范式;“共智”需要通过不同孪生体之间的多学科耦合仿真才能让思想碰撞,才能产生智慧的火花。

最后,关于数字孪生体的成熟度模型,也是基于以上的考虑,从更为抽象的层次和更具价值的领域出发,提出一个放之四海皆准且有益于数字孪生体这门学科进化发展的模型。

参考文献

- [1] Michael Grieves, John Vickers. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems [M]. // Kahlen, Flumerfelt, Alves (Eds). Trans-Disciplinary Perspectives on System Complexity. Switzerland: Springer, 2016:85-114
- [2] Michael Grieves. Virtually Perfect: Driving Innovative and Lean Products through Product Lifecycle Management [M]. Cocoa Beach: Space Coast Press, 2011
- [3] Michael Grieves. 智能制造之虚拟完美模型 驱动创新与精益产品 [M]. 方志刚, 张振宇, 等译. 北京: 机械工业出版社, 2017
- [4] Piascik R, Vickers J, Lowry D, Scotti S, Stewart J, Calomino A. Technology Area 12: Materials, Structures, Mechanical Systems, and Manufacturing Road Map [R]. NASA Office of Chief Technologist, 2010
- [5] Shafto M, Conroy M, Doyle R, Glaessgen E, Kemp C, LeMoigne J, Wang L. Technology Area 11: Modeling, Simulation, Information Technology and Processing Roadmap [R]. NASA Office of Chief Technologist, 2010
- [6] Tuegel E J, Ingraffea A R, Eason T J, Spottswood S M. Reengineering Aircraft Structural Life Prediction Using a Digital Twin [J/OL]. International Journal of Aerospace Engineering, 2011. <http://dx.doi.org/10.1155/2011/154798>
- [7] Gartner Survey Reveals Digital Twins Are Entering Mainstream Use [EB/OL]. (2019-2-20). <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2019-02-20-gartner-survey-reveals-digital-twins-are-entering-mainstream-use>
- [8] Richard Lipsey, Kenneth Carlaw, Clifford Bekar. Economic Transformations: General Purpose Technologies and Long-Term Economic Growth [M]. Oxford University Press, 2006
- [9] 胡权. 数字经济学家的使命及主要任务 [EB/OL]. 数字经济学家微信公号, 2019-10-8. <https://mp.weixin.qq.com/s/oE0E4FMQYTtTqmaG43ewJw>
- [10] John Wheeler. 宇宙逍遥 [M]. 田松, 南宫梅芳, 译. 北京: 北京理工大学出版社, 2006

- [11] 段海波. 当正向设计遇见增材制造 [EB/OL]. 安世亚太微信公号, 2018-2-8.
https://mp.weixin.qq.com/s/O4mn2MQesiZ29EK_ERZIXQ
- [12] 全国信息技术标准化技术委员会. 物联网 参考体系结构: GB/T 33474-2016 [S]. 北京: 中国标准化出版社, 2017
- [13] Information technology - Internet of Things Reference Architecture: ISO/IEC 30141:2018 [S/OL]. (2018-8). <https://www.iso.org/standard/65695.html>
- [14] Digital Twin manufacturing framework - Part 1: Overview and general principles: ISO/CD 23247-1 [S/OL]. (2019-9-4). <https://www.iso.org/standard/75066.html>
- [15] Digital Twin manufacturing framework - Part 2: Reference architecture: ISO/CD 23247-2 [S/OL]. (2019-9-4). <https://www.iso.org/standard/78743.html>
- [16] 徐光宪. 物质结构的层次和尺度 [J]. 科技导报, 2002,(1):3-6
- [17] Werner Kritzing, Matthias Karner, Georg Traar, et al. Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification [J/OL]. IFAC, 2018, 51(11):1016-1022. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474>
- [18] 区块链 [EB/OL]. <https://baike.baidu.com/item/区块链/13465666>
- [19] 虚拟现实 [EB/OL]. <https://baike.baidu.com/item/虚拟现实>
- [20] 工业控制系统 [EB/OL]. <https://baike.baidu.com/item/工业控制系统/5455114>
- [21] MES [EB/OL]. <https://baike.baidu.com/item/MES/12006591>
- [22] PLM [EB/OL]. <https://baike.baidu.com/item/PLM/3114270>
- [23] 企业资源计划 [EB/OL]. <https://baike.baidu.com/item/企业资源计划>
- [24] Derrick Cheung, Hu Qingbao. 数字化工艺仿真 [EB/OL]. (2019-10-9).
<https://zhuanlan.zhihu.com/p/85856322>
- [25] Tecnomatix. 工厂和生产线物流过程仿真 [EB/OL]. (2011-2-28).
<http://tecnomatix.e-works.net.cn/document/201102/article12098.htm>
- [26] 梁乃明, 方志刚, 李荣跃, 等. 数字孪生实战: 基于模型的数字化企业(MBE) [M]. 北京: 机械工业出版社, 2019
- [27] Herman van der Auweraer. Connecting physics based and data driven models: The best of two worlds [R/OL]. (2018-3-6).
<https://www.ima.umn.edu/2017-2018/SW3.6-8.18/26842>

- [28] Chris MacDonald. 为泵创建数字孪生体 [J/OL]. ANSYS ADVANTAGE, 2017, 11(1):8-10.
<https://www.ansys.com/zh-CN/About-ANSYS/advantage-magazine/Volume-XI-Issue-1-2017/creating-a-digital-twin-for-a-pump>
- [29] 陶飞, 刘蔚然, 张萌, 等. 数字孪生五维模型及十大领域应用 [J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(1):1-18
- [30] 计算机集成制造系统编辑部.《计算机集成制造系统》数字孪生系列报道(一): 数字孪生及应用 [EB/OL]. (2018-02-27).
<https://xw.qq.com/cmsid/20180227G07OMW>
- [31] 陶飞, 马昕, 胡天亮, 等. 数字孪生标准体系探究 [EB/OL]. (2019-11-26).
https://www.sohu.com/a/356688593_774700
- [32] 唐乾琛. 数字孪生技术发展趋势与安全风险浅析 [EB/OL]. 全球技术地图微信公号, 2019-8-18. <https://mp.weixin.qq.com/s/ZbcYyVIIUxKfSpbAPLeJXg>
- [33] Digital twin applications [EB/OL].
<https://new.abb.com/control-systems/features/digital-twin-applications>
- [34] Mikel Armendia, Mani Ghassempouri, Erdem Ozturk, et al (Eds). Twin-Control: A Digital Twin Approach to Improve Machine Tools Lifecycle [M/OL]. Switzerland: Springer, 2019. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-02203-7>
- [35] 郝秋红. 创成式设计及增材制造 颠覆传统设计制造模式 [EB/OL]. (2017-9-21). <http://m.e-works.net.cn/report/2017GDAM/GDAM.html>
- [36] 何泉吟, 王晗. 第四次工业革命视域下全球价值链的发展趋势及对策 [J]. 企业经济, 2017, (6):151-156
- [37] 孙林岩, 李刚, 江志斌, 等. 21 世纪的先进制造模式——服务型制造 [J]. 中国机械工程, 2007, (19):2307-2312
- [38] 杨洋. 数字孪生技术在供应链管理中的应用与挑战 [J]. 中国流通经济, 2019, (6):58-65
- [39] DHL Trend Research. Digital Twins in Logistics: A DHL perspective on the impact of digital twins on the logistics industry [R/OL]. (2019-6-27).
<https://logistics.dhl/vg-en/home/insights-and-innovation/thought-leadership/trend-reports/digital-twins-in-logistics.html>

- [40] 3D 打印网. UPS 与 SAP、Fast Radius 携手实现 3D 打印规模化生产 [EB/OL]. (2016-11-15).
<https://3dprint.ofweek.com/2016-11/ART-132107-8130-30066687.html>
- [41] 国外航空发动机维修模式及其竞争关系 [N/OL]. 中国航空报, 2016-9-20.
<http://www.cannews.com.cn/2016/0920/158649.shtml>
- [42] 刘魁, 王潘, 刘婷. 数字孪生在航空发动机运行维护中的应用 [J]. 航空动力, 2019, (4):70
- [43] 温杰. GE 公司研制全新的 Catalyst 涡桨发动机 [J]. 航空动力, 2018, (5):16-18
- [44] Leon1741. 人脸识别的十个关键技术组成及原理 [EB/OL]. (2018-8-2).
<https://blog.csdn.net/leon1741/article/details/81358466>
- [45] Maryam Farsi, Alirza Daneshkhah, Amin Hosseinian-Far, et al (Eds). Digital Twin Technologies and Smart Cities [M]. Switzerland: Springer, 2020
- [46] 中国信息通信研究院. 数字孪生城市研究报告(2019 年) [R]. 2019
- [47] 赛迪顾问. 中国智能城市发展战略与策略研究(2019) [R]. 2019
- [48] 黄梦龙. 基于三维 GIS 的城市规划辅助决策技术研究 [J]. 测绘与空间地理信息, 2015
- [49] 马爱丽, 等. 基于智能井盖的物联网+市政一体化系统 [J]. 物联网技术, 2016
- [50] 徐逸飞. 浅谈人脸识别在新型智慧城市建设的应用 [J]. NEW BUSINESS WEEKLY, 2018
- [51] 蔡文文, 等. BIM 与 SuperMap GIS 数据集成技术 [J]. 地理信息世界, 2018
- [52] 周洪波, 等. 基于 IFC 标准的 BIM 构件库研究 [J]. 图学学报, 2017
- [53] 冯振华, 等. 新一代三维 GIS 关键技术研究与实践 [J]. 测绘与空间地理信息, 2017
- [54] 王瑜, 等. 3D GIS 技术的发展与应用 [J]. 甘肃科技, 2009
- [55] 唐月亮. 《物联网支持下传感技术作为智能城市服务模型的探究》翻译报告 [D]. 河南大学, 2014
- [56] 泰一数据. 突破传统智慧城市禁锢超级智能城市来了 [EB/OL]. (2018-4-25).
https://www.sohu.com/a/229374157_99987923
- [57] National Research Foundation Prime Minister's Office SINGAPORE. Virtual

- Singapore [EB/OL]. <https://www.nrf.gov.sg/programmes/virtual-singapore>
- [58] 田丰, 杨军. 城市交通数字化转型白皮书 [R]. 阿里云研究中心, 2018
- [59] 晓军视点. 以数字孪生城市推动新型智慧城市建设 [EB/OL]. (2017-12-15).
http://www.sohu.com/a/210638709_481474
- [60] 朱礼俊, 史秀保. 城市仿真技术发展历程及技术流派初步研究 [J]. 城市建设理论研究, 2012
- [61] 顾星晔, 等. 3D-GIS 与 BIM 的数据融合与应用关键技术研究 [J]. 建筑工程技术与设计, 2017, (6)
- [62] Shashank Narayan. Extending digital engineering from the component to the mission level [G]. Global Product Data Interoperability Summit, 2019
- [63] Shyam Nath. Digital Twin for the Transportation Industry [G]. Intelligent Transport Systems Forum, 2019
- [64] Andres Sousa-Poza. Mission Engineering [J]. International Journal of System of Systems Engineering, 2015,6(3):161-185
- [65] David Drazen. Cyber-Physical Systems: Navy Digital Twin [G]. ISEA of the Future Forum, 2018
- [66] Myo Kyaw Sett, Humza Akhtar, Bao Huy Huynh, et al. Digital Twin Development for Serial Manipulators: Data Driven Optimized Planning and Sequencing of Tasks [J/OL]. IIC Journal of Innovation, 2019, (11).
<https://www.iiconsortium.org/news/joi-articles/2019-November-Joi-Digital-Twin-Development-for-Serial-Manipulators.pdf>
- [67] Mark Maybury. Air Force Cyber Vision 2025 [G]. 5th International Symposium on Resilient Control Systems, 2012
- [68] John Shaud. Air Force Strategy Study 2020-2030 [R]. USAF, 2011
- [69] Cyber Vision 2025: USAF Cyberspace Science and Technology Vision 2012-2025 [R]. United States Air Force AF/ST TR 12-01, 2012
- [70] Thomas Donilon. Commission On Enhancing National Cybersecurity [R]. Report On Securing And Growing The Digital Economy, 2016
- [71] DoD. DoD Strategy For Operating In Cyberspace [R]. 2011
- [72] John Marburger. Strategic Plan For The U.S. Integrated Earth Observation System

- [R]. Interagency Working Group on Earth Observations, 2005
- [73] Brian Mazanec. Lessons for the Cyber Battlefield from the Early Nuclear Era's Single Integrated Operating Plan [R/OL]. (2019-1-18).
<https://www.fdd.org/analysis/2019/01/18/lessons-for-the-cyber-battlefield-from-the-early-nuclear-eras-single-integrated-operating-plan/>
- [74] The Aspen Institute. Homeland Security and Intelligence: Next Steps in Evolving the Mission [R/OL]. (2012-1-18).
<https://www.aspeninstitute.org/publications/homeland-security-intelligence-next-steps-evolving-mission/>
- [75] Lt Gen, Jay Kelley. Air force 2025 [R]. Maxwell Air Force Base, 1996
- [76] Dorothy Denning. 信息战与信息安全 [M]. 吴汉平译. 北京: 电子工业出版社, 2003
- [77] 李耐国. 信息战新论 [M]. 北京: 军事科学出版社, 2004
- [78] 郭宗峰, 邵广和, 耿炳新. 陆军部队进攻战斗效果评估模型 [J]. 指挥控制与仿真, 2014, 36(4):76-81
- [79] 王赟, 蔡帆. 国外武器装备体系仿真技术综述 [J]. 兵工自动化, 2015, 34(7):15-20
- [80] 王会霞, 陈宜成, 谭浪, 等. 基于云平台的体系化仿真技术研究 [J]. 控制与信息技术, 2018, (6):100-103
- [81] 李炎. 军用数据链应用现状及其未来趋势 [J]. 长春理工大学学报, 2009, 4(11):187-188
- [82] 黄寒砚, 王正明. 武器毁伤效能评估综述及系统目标毁伤效能评估框架研究 [J]. 宇航学报, 2009, 30(3):827-836

版权说明

《数字孪生体技术白皮书》内容及原创性插图的版权为安世亚太科技股份有限公司所有，其它个人或组织在引用时请注明出处或与安世亚太公司联系。

在本书中所引用在文字内容或图片已经在正文、图标题给出了说明，或将相关文献列入了本书结尾处的参考文献中。由于部分图片没有找到原出处，如有知者或已经涉及侵权，请主动联系我方，我方及时采取补救措施：注明原出处或进行删改。

安世亚太公司联系方式：010-52167525，邮箱：info@peraglobal.com。

图 1 数字孪生体最初概念模型及其术语名称的前身——PLM 的概念化理想	1
图 2 数字孪生体的发展历程	2
图 3 数字孪生体在第四次工业革命进程中的遍在性	5
图 4 概念模型、参考架构、应用框架、成熟度模型之间的关系	10
图 5 数字孪生体的概念模型	11
图 6 数字孪生系统的通用参考架构	12
图 7 数字孪生体应用场景的参考框架	13
图 8 数字孪生体成熟度模型	14
图 9 数字孪生体建模技术扩展框架	16
图 10 工业化视角下的 PLM 建模技术体系 (来源: CIMdata)	17
图 11 城市化视角下的建模技术体系	18
图 12 制造场景下的仿真示例	20
图 13 在城市场景下的仿真示例	20
图 14 数字线程示例	23
图 15 数字孪生体与数字线程的关系 (来源: 波音)	23
图 16 MBSE 是实现数字孪生体和数字线程的顶层框架 (来源: 波音)	25
图 17 物联网参考架构 (来源: GB/T 33474-2016)	26
图 18 区块链在智能制造场景中的应用示例 (来源: NIST)	30
图 19 数字孪生制造系统的参考架构	33
图 20 数字孪生体技术驱动产品研发设计示例 (来源: DHL)	42
图 21 数字孪生体技术驱动生产加工过程示例 (来源: DHL)	43
图 22 ABB 利用数字孪生体设计物料堆放场 (来源: ABB)	44
图 23 数字孪生机床 (来源: 《Twin-Control》)	44
图 24 数字孪生机床的液压控制系统 (来源: 《Twin-Control》)	45
图 25 基于数字孪生体的服务模式 (来源: ANSYS)	46
图 26 超临界二氧化碳循环实验管网系统 (来源: Flownex)	47
图 27 流程制造过程的数字孪生体 (来源: Flownex)	48
图 28 DTC 产品营销特色和对供应链及数据的要求 (来源: 飞马旅创投)	50

图 29 增材制造突破传统产品设计和制造的限制 (来源: 卢秉恒院士)	52
图 30 增材制造突破传统产品设计的限制	52
图 31 增材制造技术对产业的影响	53
图 32 全数字化的增材制造全过程 (来源: 安世亚太和德勤)	54
图 33 数字孪生产业系统的参考架构	58
图 34 创成式设计汽车轮毂、面向设计规则的自动设计	67
图 35 供应链数字孪生体各要素的关系 (来源: SKF)	69
图 36 供应链和物流中的数字孪生体 (来源: DHL)	70
图 37 太空 3D 打印 (来源: MADE IN SPACE)	75
图 38 增材制造对航空发动机轻量化和减少零件数量的贡献 (来源: GE)	76
图 39 增材制造对研发组织、供应商管理、维保服务的简化 (来源: GE)	76
图 40 ANSYS 和 GE 开展预测性维护应用 (来源: ANSYS)	77
图 41 城市信息化建设应用及发展变化 (来源: 安世亚太与中机创)	79
图 42 数字孪生城市系统的参考架构	81
图 43 3D-GIS 环境与 BIM 数据的集成应用 (来源: 《建筑工程技术与设计》) ..	89
图 44 传统智慧城市与数字孪生城市数据的不同应用特征 (泰一数据)	93
图 45 智能家居管理中心 (来源: 资本实验室今日创新观察)	99
图 46 实景整合 3D 的虚拟新加坡 (来源: 新加坡政府技术局)	100
图 47 虚拟新加坡一决策优化应用 (来源: 新加坡政府技术局)	101
图 48 虚拟新加坡一可访问性改善应用 (来源: 新加坡政府技术局)	102
图 49 虚拟新加坡一支持城市规划应用 (来源: 新加坡政府技术局)	102
图 50 虚拟新加坡一太阳能生产潜力分析 (来源: 新加坡政府技术局)	103
图 51 指挥自动化系统演化图	105
图 52 包含人类行为建模的系统构想图 (来源: Cyber Vision 2025)	107
图 53 数字孪生战争 (来源: Cyber Vision 2025 和安德的游戏)	107
图 54 战场数字孪生体总体运行框架	109
图 55 数字孪生战场的参考架构	109
图 56 系统损伤定位分析的基本流程	113
图 57 军用仿真系统可信度保障 (来源: 兵工自动化)	115

图 58 小型无人机在战场上的应用 (来源: 军事文摘)	117
图 59 双人驾驶飞机模拟器 (来源: Cyber Vision 2025)	119
图 60 小队特种作战训练系统运转与功能逻辑架构	119
图 61 战役体系对抗演练系统运转与功能逻辑架构	121
图 62 战场态势综合显示系统运转与功能架构图	121
图 63 国际政治态势发展推演 (来源: 美国空军 2025)	123
图 64 国家战略态势分析系统的运转与功能框架	124
图 65 战场环境的数字孪生体 (来源: 网络)	126



关注官方订阅号
DigiTwinLab

致力于数字孪生体技术的研究与发展
通过解决方案和工程化应用造福人类

安世亚太科技股份有限公司
数字孪生体实验室