

DOI: 10.3969/j.issn.2096-8299.2022.04.016

# 数字孪生技术的应用及进展

龙玉江, 李 洵, 舒 彧, 杨濡蔓, 卫 薇

(贵州电网有限责任公司信息中心, 贵州 贵阳 550000)

**摘要:** 数字孪生技术是以各行业中日益增长的数据库存储为基础, 结合各行业的数字手段, 构建物理实体在虚拟空间中的孪生体模型, 并基于模型结合虚拟空间技术对物理空间发展做出指导性预测。首先介绍了数字孪生技术的起源, 以及数字孪生技术的分层理念和关键技术, 并对国内外各行业的基于数字孪生技术的具体应用进行了分析, 归纳了数字孪生技术出现的原因和能够解决的问题; 然后结合现有研究成果, 分析了该技术目前存在的困境, 并对其未来发展趋势进行了展望。

**关键词:** 数字孪生技术; 数字建模; 数字电网; 优化算法

中图分类号: TM63

文献标志码: A

文章编号: 2096-8299(2022)04-0409-06

## Application and Progress of Digital Twin Technology

LONG Yujiang, LI Xun, SHU Yu, YANG Ruman, WEI Wei

(Information Center of Guizhou Power Grid Company Limited, Guiyang, Guizhou 550000, China)

**Abstract:** Digital twin technology is based on the increasing database storage in various industries, combined with the digital means of various industries, constructs the twin model of physical entities in virtual space, and makes a guiding prediction for the development of physical space based on the model combined with virtual space technology. This paper first introduces the origin of digital twin technology, the purpose of digital twin technology, and the layered concept and key technology of digital twin technology, analyzes the specific application based on digital twin technology in all industries at home and abroad, and summarizes the reasons for the emergence of digital twin technology and the problems that can be solved. Then, combined with the existing research results, this paper analyzes the current difficulties of this technology, and provides the future development trend.

**Key words:** digital twin technology; digital modeling; digital power grid; optimization algorithm

美国密歇根大学的 GRIEVES M 和 VICKERS J 于 2003 年提出了将物理产品用等价的数字化模型表达的。这一概念被后人称为镜像空间模型与信息镜像模型。该模型被视为数字孪生模型的雏形, 已经具备了一定的可行性<sup>[1]</sup>。2009 年, 美国空军

实验室提出了“机体数字孪生”这一概念, 这是数字孪生一词的首次出现。随后在 2010 年美国国家航空航天局的独立报告<sup>[2]</sup>中, 数字孪生作为单独概念被提出, 将一种多维度、多科学、多物理量、多概率的飞行器模拟仿真过程认定为数字孪生。该概念

收稿日期: 2021-10-30

通信作者简介: 龙玉江(1976—), 男, 本科, 高级工程师。主要研究方向为信息技术、电力大数据。E-mail: lixun8266687@163.com。

引起了学术界广泛的重视及认同,由于其可预见地能够减少各行业的研发损失,所以相关研究也随之广泛展开。2013年,美国空军发布的《全球地平线》顶层规划文件<sup>[3]</sup>中,将数字孪生称为“改变行业规则”的顶尖技术。2016年,全球最具权威的顾问公司GARTNER将数字孪生技术列为全球十大战略科技发展趋势之一。2020年,我国“十四五”规划纲要<sup>[4]</sup>明确提出要“探索建设数字孪生城市”,目前上海等地已经开展数字孪生城市的相关实践。

随着时间的推移以及数字孪生技术的不断发展,如何将数字孪生技术与云计算、机器学习、人工智能等新兴热点技术相结合,是数字孪生技术从理论模型走向实际应用的重点研究方向。

### 1 数字孪生技术发展需求

孪生指的是物质世界中客观存在的实体与人们创造的尽可能接近现实的虚拟环境中存在的虚拟物体,二者一体双生。又因其中虚拟体以数字信号的形式存在于数字空间中,故得名数字孪生。任何技术的出现与进步都代表着现实中对该项技术的客观需求,数字孪生技术的出现主要与以下几方面需求有关。

(1) 价值需求 虚拟是实体的先行者,通过在接近现实的条件下的模拟分析与计算,给出实体在一定条件下的模拟结果,帮助人们进行更准确的判断,降低各方面的成本,进一步提升产品价值与可靠性,创造更多更好的财富。

(2) 合作需求 由于国家之间基础设施的

差距以及时间和空间上的限制,别国专家对需求国家的帮助方案往往因为相对实际发展的滞后难以达到预期效果。然而,数字孪生技术的出现,可以使各个国家紧密联系,共享时空,实现远距离的、高效的、符合需求国国情的援助方案提供。因此,数字孪生技术的发展有助于缩短国与国之间的界限,在全球范围内实现真正的同步合作。

(3) 能源需求 当今世界的经济发展日新月异,我国几十年的科学发展使我们成为了当今世界的第二大经济体,并正向第一稳步迈进。这一切需要的不仅仅是经济的发展,而且更需要技术的领先,而能源技术是其中最为关键的技术之一。通过能源行业的数字化对有限的能源进行高质量调度,实现高精度化发展是能源行业对“碳达峰、碳中和”这一目标提出的又一创新性答卷。

### 2 数字孪生的分层理念和关键技术

数字孪生技术的具体应用,需要许多理论的支撑及特定行业问题的解决方案。下面介绍数字孪生技术的分层理念和关键技术。

#### 2.1 分层理念

国内的数字孪生分层标准基本参照中国电子技术标准化研究院提出的框架,将一个数字孪生体按作用进行分层,分别为功能层、数据互动层和基础支撑层共3层,同时对每层所需要实现的功能进行分配。数字孪生基础分层架构如图1所示。

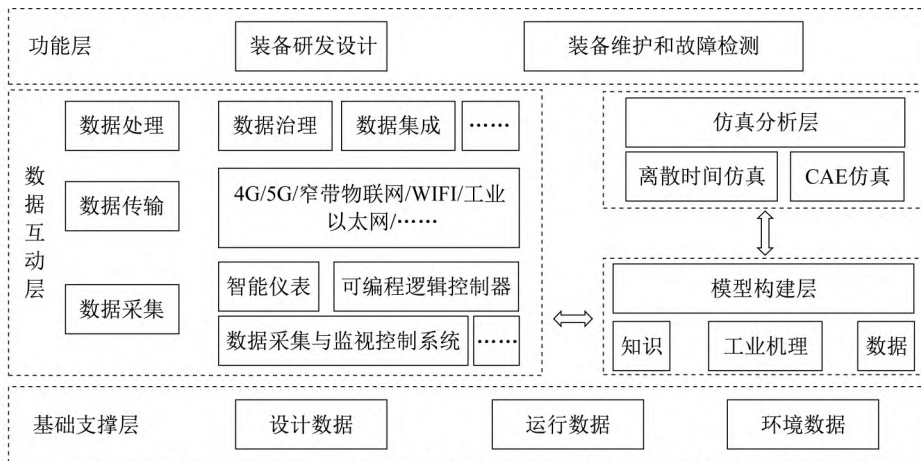


图1 数字孪生基础分层架构

在该模型的基础之上,各行业结合自身特点,根据所使用工业软件的不同对该基础模型进行加工,总结并提出了符合自身行业特点的数字孪生分层理念。杨帆等人<sup>[5]</sup>结合了数字孪生的基础分

层架构和电力行业的技术特点,总结了一种较为直观的电力装备数字孪生架构,用于分析电力装备由生产到使用的全过程。

该架构如图2所示。

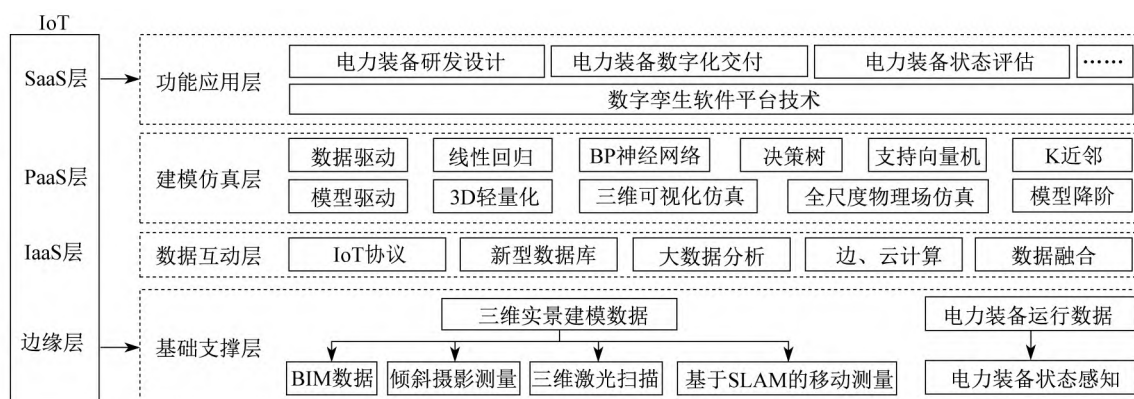


图2 电力装备的数字孪生技术架构

## 2.2 关键技术

基于数字孪生的基础分层理念,可以总结出数字孪生技术解决问题的一般方法。首先,构建一个能够与物理实体进行实时数据传输的通道。其次,在实时数据的基础上对需要解决的问题进行高度仿真的数字孪生建模,并对该模型进行仿真分析。若结果符合需求,则利用该数字孪生体进行辅助决策,帮助实现改善产品设计、提高生产效率等生产目标或是实现故障诊断与预警等维护目标。最后,将整个数字孪生分析过程程序化、窗口化、模板化,转化为不同行业的不同数字产品。

(1) 建模 是数字孪生技术研究的前提和基础。相比传统建模,数字孪生的建模不仅需要物理对象的实体特征进行细致的三维建模,而且还需要对物理实体的运行特征进行模拟,包括物体的材质、运行方式、软件算法等进行完全数字化建模。

(2) 仿真 是验证数字孪生建模正确性的关键方法。仿真的结果能确认数字孪生体能否精确重现实体的客观运行规律,对物理实体的数据采集是否达到了精确性要求。数字孪生建模的每一步前进都需要仿真结果的支持。

(3) 数据处理 大量数据的有效收集是数字孪生技术的基础,是数字孪生技术实现包括故障诊断、结果预测、问题认识等多项功能的技术支

撑。由于数据采用实时传输,用于数字孪生技术的数据有密度高、多数数据价值低等特点。数字孪生技术的时效性要求高,因此需要通过更高层级的算法对数据进行相应的实时处理,使数据的传递更为高效。

(4) 深度学习 是数字孪生体完成问题认知、诊断、预测、辅助决策等各项功能的基础。在数字孪生系统的深度学习中,数字孪生体会对大量的实时数据作出分析,进行模拟实训,最终使数字孪生体在数据条件不完备的情况下,具备实现提前预知、辅助决策的核心功能。

(5) 终端建设 数字孪生技术的结果落实到应用层,需要有效的终端表现技术,要求终端能及时提取并显示出相关的数据。具体表现为不同行业的各种成品,能够在各行业的数字化转型过程中起到推进作用。终端需要能够与数字孪生体及物理实体间进行实时的、可交互式的连接。

## 3 数字孪生技术应用

### 3.1 机械制造方面

LEE J等人<sup>[6]</sup>认为数字孪生技术不应该只用于对产品制造及功能的仿真实验中,还应该考虑将数字孪生技术作为核心,结合大数据和云计算平台等新兴技术,创造新的数字孪生体。其主要功能是为先进制造业服务,提供包括方案演算、故

障分析、实时优化、辅助决策等功能在内的、一体化的数字服务,使制造业向高端更进一步。

在顶层设计方面,文献[7]对数字孪生的实体进行了需求分析,利用公式化理论进行研究,得出了一种优化的需求部署方案,从顶层明确了应用的实施策略,充分发挥数字孪生的技术优势来解决物理实体的具体应用问题。在实际应用方面,文献[8]针对叶片转子装置在现有监控条件下监控难、监控所得数据不准确等问题,提出了使用数字孪生技术来解决该问题,基于RS-485及其他通信协议,创建了包含基础设施实时通信、虚拟空间建设、虚拟空间交互3项技术的集成系统。文献[9]首次提出了在线机械残余应力控制系统,将实时模型的仿真与在线反馈相结合,实现了闭环残余应力控制,并将该方法应用于某大型机床。文献[10]提出并创建了一个数字孪生模型,用来帮助机器人进行在线编程。文献[11]提出了一个改进的随机森林(Improved Random Forest, IRF)算法,通过模型训练,培养一个用于解决生产线上故障的诊断模型,并且将算法的准确率提高到了97.8%。

### 3.2 电力系统方面

电力系统的数字孪生模型多种多样,按种类可分为数据驱动统计模型和知识驱动的微分代数模型。在单一模型研究生物方面,经过长期的不断研究,目前已经取得了长足的进步,我国已处于世界前列。彭文等人<sup>[12]</sup>于2019年提出了一种电力市场中基于长短期记忆神经网络(Long Short Term Memory, LSTM)的短期负荷预测模型,该模型能基于电价及历史符合相关性给出较为准确的预测。

但是,单一模型研究问题是不全面的,将多种模型结合起来综合地看问题,是数字电力系统发展的重要一步。因此,数字孪生技术的出现弥补了不同模型数据上的不一致性,使得电力数字孪生模型的建立成为可能。

在电力模型构建方面,常春等人<sup>[13]</sup>提出了一种电力运行的数字孪生方案,模型如图3所示。该方案应用了逆向稳态搭建的数学模型,使得系统在离线运作的状态下依然能够较为准确地预测发展趋势。

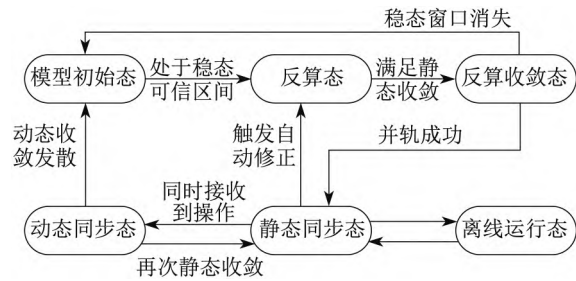


图3 逆向稳态数字孪生模型

在已有数字孪生模型的基础上,针对电力系统的具体问题可以给出不同的数字孪生解决方案和具体算法。史凯钰等人<sup>[14]</sup>提出了一种基于LSTM的数字孪生系统,用于预测光伏发电功率,并结合历年光伏数据,得到了较为准确的结果,验证了数字孪生模型在电力预测领域的实用性和可行性。

由此可知,数字孪生技术及智慧电网的数字孪生体构建相关研究在国内得到了不断深入的发展。由算法到具体架构,由发电功率到输电线路,相关研究已经由顶层构建转向具体化、专业化、模块化。具体应用层的相关研究也已经开启,全面构建数字电网是电力数字孪生领域未来的主攻方向。

### 3.3 其他行业

除了在制造类、物联网类项目中进行广泛应用外,数字孪生技术还在教育类、文化类、生活类项目中也产生了深远影响。不仅对行业中原有的一些工作方法进行了优化与重构,而且还对行业中的难点进行了有针对性的研究。

在教育行业,以美国加州大学为首的部分学校已经进行探究并总结出了初步的理论基础,以“做中学”等理论为基础,将学习者、教师、数字孪生体、群体交流进行有机结合<sup>[15]</sup>。在此基础上,李海峰和王玮<sup>[16]</sup>将该教育模式总结为如图4所示的模式。

在传统艺术品的保养与三维重构上,数字孪生技术凭借其对细节的高精度还原,为现代艺术品重构提供了新方法。文献[17]发明了一种基于通向历史数字孪生的全面数字化路径的博物馆艺术品维修及其保存方法,并且设计了基于激光扫描测量三维状态的估算模型。

在物流行业的新发展中,数字孪生技术凭借其模拟计算的优势,在路径优化、车辆调度等问题

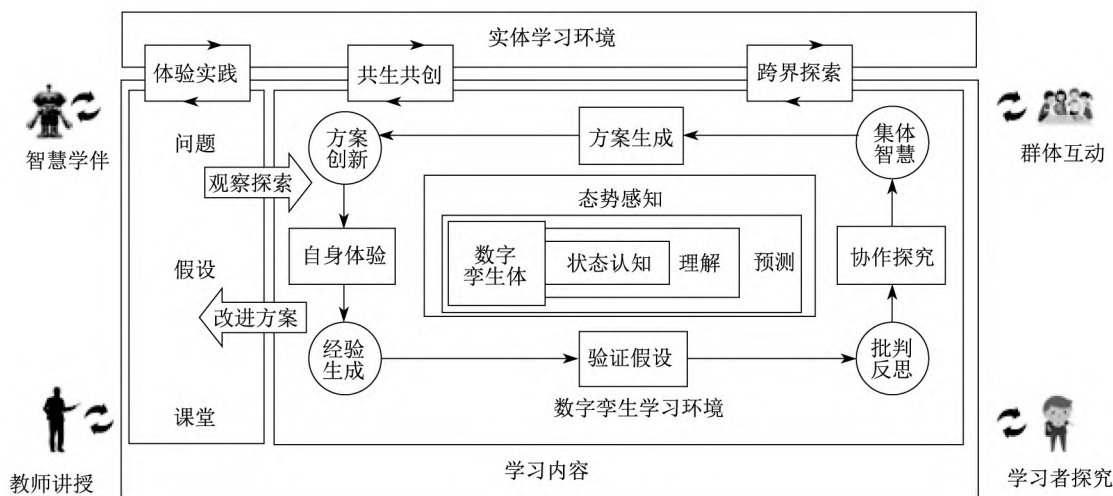


图4 数字孪生教育应用一般性模式

上有着独特的优势,可以节约物流成本,更早地预见道路情况并做出应对,更快地将物品送到收货人手中。因此,物流行业的数字孪生模拟计算研究也已经逐步走上正轨<sup>[18]</sup>。

#### 4 数字孪生技术展望

目前数字孪生发展水平良莠不齐,许多被宣传的技术实际上只流于表面,并没有与数据进行深度结合,解决方案往往模板化严重,难以摆脱现有的经典方案,使数据分析难有实际意义。基于对现有数字孪生技术的分析,并基于速度更快、层次更高、数据更多、能源基础更强4个特点,提出了其未来发展的热点和趋势,具体如下。

(1) 高性能计算设备及优化算法的研究 数字孪生技术真正落到实处,需要对虚拟模型进行实时的庞大的计算。这些都是数据孪生应用层面需要解决的问题。

(2) 综合性建模的研究 一种更好的模型表述方法,是数字孪生技术未来发展的关键,也是其迈向更高点的必由之路。综合性建模的完成,使得不同问题可以在同一结果内完成,这种结果对实际规划有着跨时代的意义。

(3) 高性能数据收集装置的研究 数字孪生技术的研究需要基于实体传输回来的数据,数据的准确性直接影响数字孪生模拟的准确性。因此,在数据采集方面,数据传输装置的准确性、不同环境下工作的可靠性是研究的重点和难点,也是未来发展的方向。

(4) 更优化的能源供给方案 数字孪生技术

需要实现实时计算,即使在算法上进行多次特别优化,其对硬件性能及功耗的要求也不会在一个较低层次。因此,更优化的能源生产及供给方案也是数字孪生技术广泛发展的必要方案。

#### 5 结 语

数字孪生是影响世界发展局势的重要技术,是技术数字化和现代化发展的关键,也是国家发展战略规划中提出的重要任务之一。该技术目前还处于起步阶段,主要内容大多以研究为主,实际应用少且准确性有待验证,但其具有巨大的发展潜力和广阔的发展前景。目前国家对该技术的重视程度在不断提高,未来预计将会组织相关行业协会,出台帮扶政策以形成产业链,追求产业的数字化转型。在企业和国家的双向努力下,数字孪生技术会越来越成熟,产业会越来越完善,最终造福国家和社会。

#### 参考文献:

- [1] GRIEVES M, VICKERS J. Digital twin: mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems [M]//KAHLEN F J, FLUMERFELT S, ALVES A. Transdisciplinary perspectives on complex systems. Zurich: Springer International Publishing, 2017: 85-113.
- [2] 孟松鹤,叶雨玫,杨强,等.数字孪生及其在航空航天中的应用[J].航空学报,2020,41(9):6-17.
- [3] 李鹏,潘凯,刘小川.美国空军机体数字孪生计划的回顾与启示[J].航空科学技术,2020,31(9):1-10.
- [4] 陈才.智慧城市的发展共识与“十四五”路径建议[J].中国建设信息化,2021(17):12-13.

- [5] 杨帆,吴涛,廖瑞金,等.数字孪生在电力装备领域中的应用与实现方法[J].高电压技术,2021,47(5):1505-1521.
- [6] LEE J, LAPIRA E, BAGHERI B, et al. Recent advances and trends in predictive manufacturing systems in big data environment[J]. Manufacturing Letters, 2013, 1(1): 38-41.
- [7] WEI Y L, HU T L, WANG Y Q, et al. Implementation strategy of physical entity for manufacturing system digital twin[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2022, 73: 102259.
- [8] DUAN J G, MA T Y, ZHANG Q L, et al. Design and application of digital twin system for the blade-rotor test rig[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2021. DOI: 10.1007/s10845-021-01824-w.
- [9] WARD R, SUN C, DOMINGUEZ C J, et al. Machining digital twin using real-time model-based simulations and look-ahead function for closed loop machining control[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 117: 3615-3629.
- [10] GAURAY G, VLADIMIR K, GHOLAMREZA A. Digital twin for FANUC robots: industrial robot programming and simulation using virtual reality[J]. Sustainability, 2021, 13(18): 10336.
- [11] GUO K, WAN X, LIU L L, et al. Fault diagnosis of intelligent production line based on digital twin and improved random forest[J]. Applied Sciences-basel, 2021, 11(16): 7733.
- [12] 彭文,王金睿,尹山青.电力市场中基于 Attention-LSTM 的短期负荷预测模型[J].电网技术,2019,43(5):1745-1751.
- [13] 常春,吉炫颖,朴永鑫,等.电力运行类数字孪生系统稳态逆向建模研究[J].山东电力高等专科学校学报,2021,24(2):1-4.
- [14] 史凯钰,张东霞,韩肖清,等.基于 LSTM 与迁移学习的光伏发电功率预测数字孪生模型[J/OL].电网技术,2022(4):1363-1371.
- [15] LILJANIEMI A, PAAVILAINEN H. Using digital twin technology in engineering education: course concept to explore benefits and barriers[J]. Open Engineering, 2020(1): 377-385.
- [16] 李海峰,王伟.数字孪生教育应用的教学模式探究——基于美国、瑞士和芬兰数字孪生教育应用的案例分析[J].现代教育技术,2021,31(7):12-20.
- [17] ADRIANA M, SALVATORE G, ALESSANDRO G, et al. Combining integrated informative system and historical digital twin for maintenance and preservation of artistic assets[J]. Sensors, 2021, 21(17): 5956.
- [18] 王楠,徐斌,邱明.数字孪生概述及其应用展望[J].电信快报,2021(8):6-9.

(责任编辑 胡小萍)

(上接第 408 页)

及时沟通,不仅提高了学习效率,而且在较短时间内提高了学员的技术水平。

## 4 结 语

光伏发电仿真培训系统为光伏发电领域的入职人员提供了培训的平台。多学科一体化仿真平台可在电气库中选择模块进行电气模型建模,利用控制系统图形化建模工具软件,通过相应的变量进行逻辑电路的链接,在图形显示工具软件上进行操作界面的绘制。

光伏发电仿真培训系统的开发,为快速发展的光伏发电领域人才不足等问题提供了解决方案。该仿真系统不仅能提高学员的学习热情,而且能快速提高学员的技术水平,为光电从业人员

提升自身技能和故障处理能力奠定了基础。

## 参考文献:

- [1] 刘家明,任洪波,徐海.基于空间结构视角的屋顶分布式光伏发电系统分析[J].上海电力学院学报,2019,35(2):143-148.
- [2] XU G, SU J, PAN H D, et al. Research on calibration theories and experiments of vehicle wheelbase difference[C]//2009 Third International Conference on Genetic and Evolutionary Computing. Guilin, China: IEEE, 2009: 582-585.
- [3] 张欢欢.光伏发电系统的 MATLAB 设计与仿真[J].控制工程,2013(增刊):26-29.
- [4] 韩长菊,黄岚.水泥生产虚拟仿真系统的开发与应用[J].昆明冶金高等专科学校学报,2017,33(3):8-12.
- [5] 王瀚博.光伏发电系统中最大功率跟踪方法及并网控制研究[D].沈阳:沈阳工业大学,2018.

(责任编辑 胡小萍)