

数字孪生及其质量管理方法思考

吴昊

中国西南电子技术研究所, 四川成都 610036

摘要: 数字孪生作为工业界和学术界关注的战略性技术之一, 可视为连接数字空间与物理空间的桥梁, 通过多维度动态模型、实时监测及反馈系统、动态环境模拟更新等方法, 可以在数字空间实现对物理空间的描述与预测, 从而指导更优的决策。介绍了数字孪生诞生的背景及发展历程, 梳理了国内外数字孪生技术研究现状, 阐述了数字孪生及相关概念的内涵, 最后重点讨论了针对产品全生命周期数字孪生体, 在方案设计、工程研制、设计定型、生产制造和使用维护阶段的质量管理控制方法。

关键词: 数字孪生; 质量管理; 质量控制

中图分类号: TTN915

文献标识码: A

文章编号: 1672-0164 (2023) 06-0033-03

1 引言

随着科技的发展, 新一轮科技革命和产业变革正孕育兴起, 以“智能制造”为主导的“工业4.0”“工业互联网”一第四次工业革命已经来临。为此, 各国先后提出了工业4.0, 工业互联网、先进制造伙伴计划以及中国制造2025等先进制造战略与模式^[1]。数字孪生(Digital Twin)作为一种在信息世界刻画物理世界、仿真物理世界、优化物理世界、可视化物理世界的重要技术, 为实现数字化转型、智能化(如智慧城市、智能制造)、服务化、绿色可持续等全球工业和社会发展提供了有效途径^[2]。目前, 数字孪生备受工业界和学术界关注, 已经从理论研究阶段开始向实际应用阶段发展。但与此同时, 关于数字孪生体的质量管理控制方法却缺乏相关研究。针对数字孪生体的内涵, 从方案设计阶段、工程研制阶段、设计定型阶段、生产制造阶段和使用维护阶段研究了数字孪生的质量控制方法。

2 背景介绍与发展历程

以实物试验和训练为主的武器系统研制和运用模式逐渐暴露出项目周期长、质量控制难、实施成本高等问题。武器系统研制和运用部门正逐步向基于模型的系统工程转变, 尤其是通过加强建模与仿真技术在武器系统全生命周期的应用, 充分利用数字空间低成本、高效率、多次迭代的优势, 来促进武器系统研制和运用水平、效率的提升和成本的降低^[3]。数字孪生概念随之应运而生, 数字孪生的雏形于2003年由密歇根大学的Grieves教授提出, 最初被称为镜像空间模型, 其具备3个核心要素分别为物理实体、镜像模型及其相互连接关系^[4]。2006—2010年间, 数字孪生又被称为“信息镜像模型”。美国空军研究实验室与NASA

在2011年开展合作, 提出了飞行器的数字孪生体概念, 数字孪生才有了明确的定义。2012年, NASA发布“建模、仿真、信息技术和处理”路线图, 数字孪生概念正式进入公众视野^[5]。从2017年起, 伴随着全球最具权威的IT咨询公司Gartner2017—2019连续三年将“数字孪生(Digital Twin)”评为年度十大战略性技术之一, 世界最大的武器生产商洛克希德·马丁公司视数字孪生为未来国防和航天工业6大顶尖技术之首, 数字孪生热度迅速提升, 概念外延和内涵不断扩展, 从最开始的针对工业生产过程中的新管理范式, 发展到作为智慧城市的关键技术, 体现出很大的研究价值和社会价值^[6]。2019年, Madni教授在文章《在基于模型的系统工程中利用数字孪生技术》中进一步完善了数字孪生的概念, 即数字孪生是一种多物理、多尺度、概率模拟集成系统, 这一说法是迄今为止被最广泛认同的^[7]。

3 国内外研究现状

在国外, 由于军用武器装备运维成本逐年增加, 数字孪生率先被应用于军事工业领域。美国空军实验室建立了超高保真的飞机虚拟模型, 使之与影响飞行的结构偏差以及温度计算的模型相结合, 基于数字孪生开展了飞机结构寿命预测工作^[8]。美国海军的研究实验室则将宙斯盾系统的核心硬件进行虚拟化操作, 构造了宙斯盾系统核心硬件的数字孪生, 随后在导弹驱逐舰上利用宙斯盾系统的数字孪生发射了一枚导弹且成功命中目标, 使得美国海军武器系统的形态和模式得到了巨大升级和变革^[9]。国外传统的PLM/CAX厂商也基于数字孪生规划下一代软件产品, 如ANSYS公司借助于在数值仿真领域的领先优势推出Twin Builder套件, 用户可以利用该套件搭建基于多学科的数值仿真模型, 在虚拟空间构建产品系统仿真和数字孪生, 该

收稿日期: 2023年6月26日; 修回日期: 2023年10月7日

套件支持接入PTC ThingWorx中的实时物理数据,用以对物理产品进行设计优化和预测性维护等^[10]。

2020年12月,中国工程院战略咨询中心发布了《全球工程前沿2020》,数字孪生驱动的智能制造作为机械领域的研究前沿入选,与此同时,数字孪生仿真系统则入选了工程管理领域的开发前沿^[11]。作为《中国制造2025》中CPS体系(赛博物理系统)的关键技术,数字孪生在我国受到学术界和企业界的高度关注,相关研究内容主要集中在概念内涵、技术架构、工程建模、仿真预测等方面,以期通过数字孪生带来产业数字化转型解决智能制造、智慧建造等新兴研究领域的具体实际问题^[12]。北京航空航天大学的陶飞教授于2017年提出了数字孪生车间的概念,并对其系统组成、运行机制、特点、关键技术进行了详细阐述,在此基础上探讨了基于车间孪生数据的车间物理世界和信息世界的交互与共融理论和实现方法^[13]。同年北京理工大学庄存波博士、刘检华教授等人对数字孪生体的内涵、体系结构进行了阐述,随后分析了数字孪生体在产品阶段、制造阶段和服务阶段的实施途径和发展趋势^[14]。于勇博士等人探讨了基于数字孪生模型的全三维产品构型管理方法,及其构型信息的本体表达,为全三维研制模式下的产品构型管理提供了可行方案^[15]。张帆教授等人基于矿山信息物理空间的数字孪生和深度学习方法,以实际矿井为原型设计了智能开采的数字孪生一体化方案,探讨了数字孪生赋能智慧矿山的关键技术问题和关键技术路径^[16]。

国内外关于数字孪生及数字孪生体相关研究的热度逐年上升,但文献大多针对其概念内涵、技术路径、专业应用等方面进行描述,而数字孪生体本身作为一种产品,针对其产品质量管理与控制的研究较少,通过对数字孪生体按产品研制阶段进行划分,提出了数字孪生体在五个研制阶段的质量管控重点及相应的质量管控方法,以期使数字孪生体更好的描述物理实体原型,确保其具有充分性、实时性、精确性、稳定性和可靠性。

4 数字孪生质量管理

数字孪生也被称为数字孪生技术,是指利用模型、数据、智能等多种数字技术对物理世界中实体对象的特征、行为、过程和性能等进行描述的过程,是人类解构、描述、深入认知物理世界的一种全新技术,数字孪生可以应用多种当今前沿技术如虚拟现实技术(Virtual Reality)、增强现实技术(Augmented Reality)、混合现实技术(Mixed Reality)等。而采用数字孪生技术生成的,与物理世界中的实体对象完全对应和一致的虚拟模型,则被称为数字孪生体,该虚拟模型可以实时模拟实体对象在物理世界中的行为和性能,因此也被称为数字孪生模型。

基于产品研制阶段的划分,数字孪生也应分阶段进行质量管理与控制,包括:方案设计阶段、工程研制阶段、设计定型阶段、生产制造阶段和使用维护阶段质量管理与控制。

在产品方案设计阶段,数字孪生体的质量控制重点关注其多维度数据建模的完整性和逼近性。此阶段通常还未生成物理实体,但数字孪生体可先于物理实体诞生,可通

过建立多维动态模型,在数字空间生成产品的数字孪生体,全方位多维度模拟对象的物理特性、行为逻辑和运行流程,它承载了物理实体的多维动态属性,可在数字空间中对物理实体的发展进行演化,用以验证设计方案的合理性、可行性和充分性,并实时动态反馈以修正论证方案。基于上述目标,关注的重点包括但不限于:物理特性(外形尺寸、允许公差、结构强度、动力学模型、热力学模型、疲劳强度、表面粗糙度等),时间变化特性(运行模式、行为逻辑等),空间变化特性(状态转换规则、重构模式等),确保数字孪生体无限逼近其孪生实体对象设计方案,可以通过对象特性数据分析与标识、数字孪生体特性控制与纪实、数字孪生体特性审核与确认等方式进行质量管理与控制。

工程研制阶段质量管理与控制重点在于技术状态标识、技术状态控制、技术状态纪实和技术状态审核。此阶段产品已具备物理实体且主要功能已实现,但通常因前期验证不够充分或设计要求变更而发生技术状态变化,这种变化通常还会影响到上一层级产品以及下级所有产品的技术状态,包括子系统级、设备级、独立单元级、直到最小零部件级如螺钉、螺母、弹簧等,以及它们之间的组合规则、运行规则和演化规则,因此其数字孪生体也应重点关注产品本身以及上下级产品技术状态变化。本阶段数字孪生体可由方案设计阶段孪生体继承演化而来(从设计方案向物理实体演化),在随后与实体对象同步进行技术状态变化,保持处于持续迭代更新状态。由于时间在数字空间中具有非均匀性,数字孪生体的生命时间轴可实现全域动态可调节,例如:当物理实体作为产品即将交付用户前,为了保证产品可以满足用户要求的使用寿命,可以在数字空间中将时间轴加速100倍甚至更多进行模拟试验验证,提前发现产品寿命短板,通过在数字空间完成验证试验后,根据试验分析结果对其实体对象进行反哺,改进其设计状态,从而又进入下一个轮的技术状态变化循环。

进入设计定型阶段的产品其质量管理与控制重点包括:技术状态确认、数字空间试验方法确认、试验环境控制、试验条件控制和试验结果确认。该阶段其技术状态已基本固化,通常采用一系列定型试验(如功能性能试验、环境试验、电磁兼容性试验、可靠性试验等)用以验证产品是否能够满足设计要求。本阶段数字孪生体可由上一阶段继承而来(通过若干技术状态变化循环后),得益于数字孪生体对物理对象的多维度逼近性,可以在数字空间通过数字孪生体完成部分定型试验,如破坏性试验、可靠性试验等费效比过大的试验。

在生产制造阶段质量控制重点在于,确保多源数据采集的充分性、实时性和准确性,以及数据传输的可靠性,可以通过数据过程控制(SPC)如多源数据检查表法、抽样调查法、抽样检验法、数据超采样法、数据特性分析等手段实现其质量管理与控制。数字孪生体仍然由上一阶段演化和完善而来,通过与其物理对象进行实时数据交互,将产品生产的实测数据(如生产数量、生产周期、生产进度、检验数据等)实时更新至数字空间中并进行全息展示,实现产品生产过程和数据的全面监控,通过实测检验数据与

理论设计数据对比、实际生产周期进度与计划对比等方法,可以实现产能产线动态调整、生产进度预测与分析等。

使用维护阶段数字孪生体质量控制重点在于,数字空间与物理空间数据融合与对比分析的有效性,可以通过建立关键数据库、统计分析表法、数据分层法、时间序列分析法等方法实现质量管理与控制。该阶段产品不再生产,但对产品运行状态的跟踪与监控却更加重要,因为此阶段产品已交付用户,当发生故障和质量问题时,对用户的信心和生产企业的信誉造成的打击尤为致命。数字孪生体可用于实时、动态和可视化地观测物理实体的状态,通过数字孪生体对产品的运行状态、外部环境、质量状况、使用状况、技术状态、功能状态等进行模拟,并与物理对象的实际状态、实时监测数据、使用维护记录数据等进行对比分析,从而得到产品的健康状况、寿命、功能性能预测分析,据此进行产品故障预警,预测和纠正实体运行偏差和错误,采取预防性措施避免质量问题发生,保证实体运行状态和延长实体寿命。

5 结语

数字孪生作为当今受工业界和学术界关注的战略性技术之一,其具有数字空间模型与物理空间实体孪生共存的特点,能够从产品设计初期直至产品报废回收的全生命周期内,实现孪生体实时同步动态演化,即使在物理空间环境不确定的情况下,也能利用数字空间模拟产品的演化发展趋势,实现演化行为的准确描述与预测,以此来指导人类做出更优的选择;利用数字空中时间的非均匀性,数字孪生技术还可以用于虚拟试验验证,加速产品设计进程、降低研发成本,提高产品可靠性、延长使用寿命。要确保数字孪生技术充分发挥其众多优点,则需要对数字孪生技术的应用进行严格的质量控制,先进的质量管理控制方法必不可少,考虑到数字孪生体具有与物理对象相互作用、实时影响、多维动态模拟等特点,对数字孪生体的质量控制更应优先做到充分性、实时性、精确性、稳定性和可靠性。

参 考 文 献

[1] 柳林燕,杜宏祥,汪惠芬,等. 车间生产过程数字孪生系统构

建及应用[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(6): 1536-1545.

[2] 陶飞,马昕,胡天亮,等. 数字孪生标准体系[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(10): 2405-2418.

[3] 周军华,薛俊杰,李鹤宇,等. 关于武器系统数字孪生的若干思考[J]. 系统仿真学报, 2020, 32(4): 539-552.

[4] GRIEVES M W. Product lifecycle management: the new paradigm for enterprises[J]. International Journal of Product Development, 2005, 2(1-2): 71-84.

[5] 李欣,刘秀,万欣欣. 数字孪生应用及安全发展综述[J]. 系统仿真学报, 2019, 31(3): 385-392.

[6] 廖晓红. 数字孪生及其应用跟踪[J]. 广东通信技术, 2019, 39(07): 13-16+38.

[7] 王宇婷,杨晓波. 数字孪生技术的实例应用[J]. 甘肃科技纵横, 2021, 50(8): 4-24.

[8] Kraft E M. HPCMP CREATE-AV and the air force digital thread [C]. 53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting, 2015, January 5, 2015-January 9, 2015. Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc, AIAA, 2015.

[9] NAVAL-TECHNOLOGY. US Navy performs Aegis Virtual Twin system's first live-fire engagement[EB/OL] [2019-04-25]. <https://www.naval-technology.com/news/us-navy-performs-aegis-virtual-twin-systems-first-live-fire-engagement>.

[10] Magargle R, Johnson L, Mandloi P, et al. A Simulation-Based Digital Twin for Model-Driven Health Monitoring and Predictive Maintenance of an Automotive Braking System [C]. Proceedings of the 12th International Modelica Conference, Prague, Czech Republic, May 15-17, 2017. Linköping: Linköping University Electronic Press, 2017: 35-46.

[11] 中国工程院战略咨询中心. 《全球工程前沿2020》报告发布土木、水利与建筑工程领域Top10[J]. 隧道建设, 2020, 40(12): 1741.

[12] 赵亮,许娜,张维. 我国数字孪生研究的进展、热点和前沿[J]. 实验技术与管理, 2021, 38(11): 96-104.

[13] 陶飞,张萌,程江峰,等. 数字孪生车间——一种未来车间运行新模式[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(1): 1-9.

[14] 庄存波,刘检华,熊辉,等. 产品数字孪生体的内涵、体系结构及其发展趋势[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(4): 753-768.

[15] 于勇,范胜廷,彭关伟,等. 数字孪生模型在产品构型管理中应用探讨[J]. 航空制造技术, 2017, 7: 41-45.

[16] 张帆,葛世荣,李闯. 智慧矿山数字孪生技术研究综述[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(7): 168-176.

作者简介

吴昊(1983—),男,硕士研究生,工程师,研究方向为航空电子。

Digital twin and thinking over its quality management methods

WU Hao

Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China

Abstract: As one of the strategic technologies concerned by industry and academia, digital twin can be regarded as a bridge connecting digital space and physical space. Through multi-dimensional dynamic models, real-time monitoring and feedback systems, and dynamic environment simulation updating, we can realize the description and prediction of physical space in digital space, so as to guide better decision-making. This paper introduces the background and development history of the birth of the digital twin, combs through the status quo of digital twin technology research at home and abroad, explains the connotation of the digital twin and related concepts, and finally focuses on the discussion of the quality management and control methods for the digital twin of the whole life cycle of the product in the program design, engineering development, design and finalization, manufacturing, and use and maintenance phases.

Keywords: Digital twin, Quality management, Quality control