

环境试验与评价

基于数智孪生的装备全周期敏捷试验技术

左毅¹, 樊志强^{2,3}, 曹江², 徐珞³

(1.中国电子科技集团公司第二十八研究所, 南京 210007; 2.军事科学院, 北京 100091;
3.华北计算技术研究所, 北京 100083)

摘要: 依据数智孪生的基本理论, 提出基于数智孪生的装备全周期敏捷试验技术, 在数字虚拟空间构建与物理空间孪生相像的虚拟试验环境和装备虚拟孪生体, 支持在装备全寿命周期开展试验。从整体上提出基于数智孪生的装备敏捷试验框架、面向全寿命周期的试验开展流程、虚拟试验环境构建与运行机理及试验数据处理与运用技术。通过在数字虚拟空间进行装备全周期的敏捷试验, 不但能够有效降低装备试验费用、缩短试验周期, 也可避免消耗装备的使用寿命, 并能够帮助设计人员事先了解受试装备在试验中的响应特性, 及早改进装备设计, 对后续要进行的实际物理试验, 也能提供一定的指导作用, 进而可极大提高试验效率, 实现装备的敏捷试验与运用。

关键词: 数智孪生; 全周期敏捷试验; 虚拟试验环境

中图分类号: TJ01 文献标识码: A 文章编号: 1672-9242(2021)04-0057-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2021.04.008

Digital-intelligence Twins based Full-cycle Agile Test Technology of Equipment

ZUO Yi¹, FAN Zhi-qiang^{2,3}, CAO Jiang², XU Luo³

(1. The 28th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Nanjing 210007, China; 2. Academy of Military Sciences PLA China, Beijing 100091, China; 3. North China Institute of Computing Technology, Beijing 100083, China)

ABSTRACT: Based on the theory of digital-intelligence twins, a full-cycle agile test technology for equipment is proposed in this paper. Through constructing virtual test environments and equipment virtual twins in the digital virtual space, it can be used to support equipment test throughout its whole life cycle. In the paper, an agile test framework of equipment based on digital intelligence twins, the test process in the whole life cycle of equipment, virtual experiment environment construction and operation mechanism, and experiment data processing and application technology are described. Through the full-cycle agile test of equipment in the digital virtual space, it can not only reduce equipment test costs and shorten the test cycle effectively, but also avoid consuming equipment life length, help designers to understand the equipment characteristics in test in advance and improve the equipment design as early as possible. It can also provide guidance for the actual physical tests to be carried out in the future. Moreover, the test efficiency can be greatly improved, and the agile test and application of

收稿日期: 2021-01-11; 修订日期: 2021-03-10

Received: 2021-01-11; Revised: 2021-03-10

作者简介: 左毅(1958—), 男, 研究员, 主要研究方向为信息系统顶层设计和综合集成。

Biography: ZUO Yi (1958—), Male, Researcher, Research focus: information system top-level design and integration.

通讯作者: 樊志强(1983—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为体系设计与仿真验证、数智孪生。

Corresponding author: FAN Zhi-qiang (1983—), Male, Ph.D., Senior engineer, Research focus: system design, simulation verification and digital intelligence twin.

引文格式: 左毅, 樊志强, 曹江, 等. 基于数智孪生的装备全周期敏捷试验技术[J]. 装备环境工程, 2021, 18(4): 057-063.

ZUO Yi, FAN Zhi-qiang, CAO Jiang, et al. Digital-intelligence twins based full-cycle agile test technology of equipment[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(4): 057-063.

equipment can be realized.

KEY WORDS: digital-intelligence twins; full cycle agile test; virtual test environment

传统的装备试验评估是考核装备经受规定条件下的性能,形成了“设计—制造—试验—改进”的流程方法^[1]。该流程通常周期较长,并且在试验阶段发现问题时,往往需要花费巨大的代价进行改进。为了加速装备的成熟,尽量减少装备的定型时间以及提高装备质量,尤其在航空、航天、国防和军事领域,采用仿真的技术手段进行虚拟试验得到了广泛的关注和应用^[2-8]。虚拟试验技术是指在计算机系统中采用软件代替全部硬件或部分硬件来建立各种虚拟的试验环境,应用仿真技术来确定装备满足期望寿命周期目标的过程。其基本目标是使所取得的试验效果接近或等价于在真实环境中所取得的效果^[1]。虚拟试验技术的出现,可以更加灵活、高效、敏捷地开展装备试验,促进了装备试验可以尽早开展,并在装备全寿命周期发挥作用。

2018年,美国国防部于签发了《国防部数字工程战略》^[9],强调从传统的“设计—构建—测试”方法到“模型—分析—构建”方法的范式转变,在国防科技研发与装备采办领域,贯彻系统工程思想,综合采用建模仿真、数据分析等数字化与智能化手段,构建灵活的开发环境,实现论证、研制、生产、试验等全寿命周期过程的数字化,大幅提升系统研发与建设管理的效率与效益。数字工程战略为开展装备虚拟试验提供了2个启示:一是以模型为驱动,开展虚拟试验,装备论证、设计方案选择和完成之后,在制造之前,能够在虚拟环境中构建原型,进行实验和测试,以支撑决策和确定解决方案,并允许在整个生命周期中,使用数字化虚拟模型来改进装备工程实践;二是以场景为主线,建立虚拟环境,成为管理者、最终用户和供应商有共同语言和表述方式的研讨平台,以及用于虚拟构造的试验床。

数字孪生技术的提出和发展为装备虚拟试验提供了良好的技术途径^[10-14]。数字孪生是指以数字化方式创建物理实体的虚拟模型和环境,借助数据模拟物理实体在现实环境中的行为,通过虚实交互反馈、数据融合分析、决策迭代优化等手段,为物理实体增加或扩展新的能力^[15-16]。数智孪生概念脱胎于“数字孪生”和人工智能技术。“数”更多地指向事物的数字化存在形态,“智”更多地指向组织、行为方面的智能化规则,数与智共同构造出一种“孪生”体,一个存在于现实物理世界,另一个存在于数字虚拟世界^[17-18]。与传统的数字孪生技术相比,数智孪生的特点主要有:1)数智孪生提出数智模因,是决定智能装备物理结构和行为逻辑的内生因素,相同的模因决定了虚实两界的孪生体具有相同的内生因素,确保物理世界

和虚拟世界产生完全镜像的一对孪生体,并共生共长,保证后续虚拟孪生体的交互移植能够完美匹配;2)传统数字孪生侧重于物理域、社会域的虚拟构造,数智孪生覆盖物理域、信息域、认知域、社会域等4个域,特别强调对信息域作用于认知域的仿真构造;3)传统数字孪生更多地关注虚拟空间对物理空间进行实时监控、预测分析和反馈,而数智孪生更强调在虚拟世界开展以数智虚体为主角的实践活动(虚拟试验),可以超强度、超现实、超预期、敏捷高效地检验装备/体系,并基于虚实互动,借助AI技术,在虚拟世界获得超出人类认知的知识、经验、推理、判断,并同步至现实世界,进而促进装备/体系的智能演进。

未来战争将在现实物理世界和虚拟数字世界2个域打响,装备形态也将面临颠覆性的变化,在现实物理世界运用装备进行值班、演习、调控等,在虚拟数字世界进行装备的设计、推演、预测等。因此,文中提出基于数智孪生的装备敏捷试验技术,其目的就是希望探索虚实混合的新型作战方式和装备试验方法,以有效适应未来智能化装备的敏捷试验、迭代发展和灵活应变需求。

1 基于数智孪生的装备敏捷试验框架

基于数智孪生的装备敏捷试验框架如图1所示。首先构建装备数智模因,模因是装备的模型化数字基因,是决定装备未来形态和能力表现的核心。基于数智模因,孪生构造装备的物理实体和数字虚体,保证虚实孪生体同源。基于数智孪生的装备敏捷试验强调以下3个方面。

1)虚实结合、虚体先行。尽早进行装备设计试验和验证,避免装备建设后期成本和周期的增加。因此,应先构造数字虚体,并在数字世界中进行全面的前期虚拟试验,得到优化的数字虚体结构、行为、参数等内容,然后在现实世界中进一步构造物理实体。

2)虚实互动、伴随生长。基于数智孪生的装备试验强调虚实试验的结合,考虑到现实世界中开展试验的周期长、成本高等问题,现实世界可开展部分物理环境试验,获得装备真实物理特征,并将特征与数字世界的虚拟试验进行同步。物理环境试验能够在虚拟环境中进行实时显示,看到试验过程、状态等情况,并学习现实世界中的真实物理参数,以在数字世界中更逼真地模拟。同时在数字世界中开展全面完善的虚拟试验,以弥补现实世界难以全面开展试验的不足。

3)虚实共生、迭代演进。基于数智孪生的装备

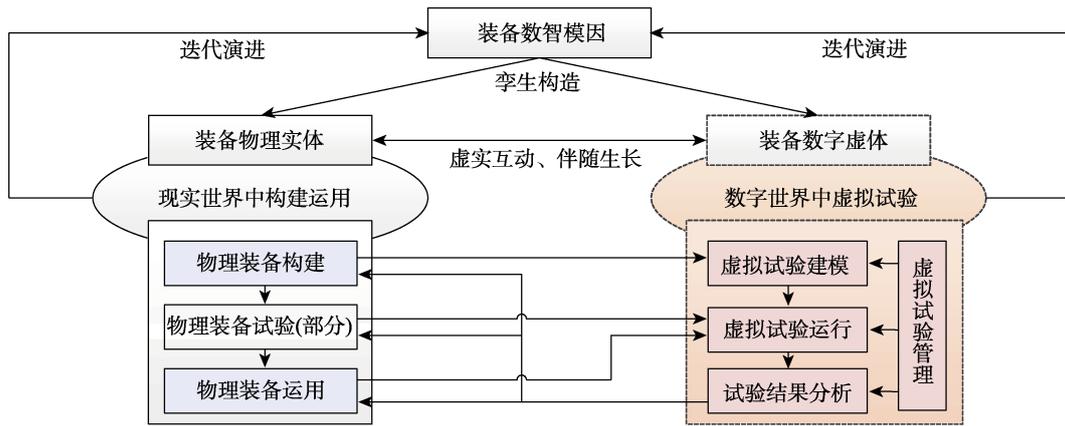


图 1 基于数智孪生的装备试验框架

Fig.1 Equipment test framework based on digital-intelligence twins

试验强调在装备的全周期进行虚拟试验，通过虚拟试验建模、虚拟试验运行、虚拟试验管理等手段对装备数字虚体进行全周期的试验，并基于对试验结果的分析，得到优化的装备方案。

需要强调的是，在装备运行阶段，基于数智模因构建的装备试验框架经过适当改造，调整管控逻辑，适配任务驱动，增加业务模型，即可成为用于实战的数字虚拟装备。该虚拟装备与实体装备相辅相成，共生共长，既可共同提高装备业务能力，又能持续进行装备试验验证，从而促进装备的快速迭代演进升级。

2 面向装备全周期的虚拟试验流程

2.1 基于数智孪生的装备全周期虚拟试验流程

美国国防部签发的数字工程战略以“模型—分析—构建”的方式进行装备的建设，并提倡在装备整个生命周期中使用模型以数字方式对装备进行工程验证和实践。在基于数智孪生的装备敏捷试验框架的基础上，给出面向装备全周期，基于数智孪生的虚拟试验流程（如图 2 所示），以指导在装备全周期过程开

展虚拟试验。装备全周期过程主要包括综合论证、工程研制和开发、生产部署、使用维护等 4 个阶段。在每个阶段，基于数智孪生的技术思想，可在数字世界对装备开展虚拟试验，以尽早发现装备的缺陷和问题，提高装备的建设质量和效率。

1) 装备综合论证阶段。该阶段主要任务是在现实世界对装备的使命任务、能力要求、结构特征、功能组成、使用环境等方面进行综合的论证分析，并基于数字化的手段，对装备进行建模，形成装备的模型化形态。如使用 CAD、3DMax 等工具对装备的结构进行建模，使用有限元分析方法对装备性能特征进行建模。此外，随着信息化技术的发展，信息装备在作战中发挥越来越主导的作用，与传统的数字孪生技术相比，数智孪生更强调对信息域的建模。因此，在该阶段，要对装备的信息域进行建模，可采用体系架构、系统架构、软件架构的建模方法（如 DoDAF 方法^[19]，信息主导的体系架构方法^[20]、Palladio 方法^[21]等），对装备体系、信息系统装备等进行建模。在该阶段，基于构建的数字化装备虚体以及装备未来可能运行的环境和场景，对装备的能力进行早期的虚拟试验，通过验证分析装备在各种场景下的能力表现，对装备的设计模型进行改进和优化。

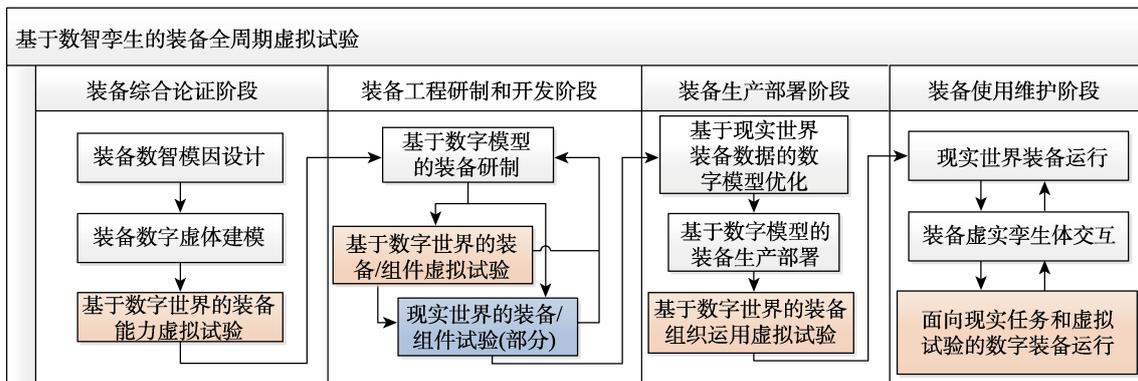


图 2 基于数智孪生的装备全周期虚拟试验流程

Fig.2 Full-cycle virtual test process of equipment based on digital-intelligence twins

2) 装备工程研制和开发阶段。该阶段主要任务是在现实世界中基于数字化的模型对装备进行研制和开发。对于复杂的装备,在该阶段应采用迭代增量的方式对装备进行研制和完善。在此过程中,可在数字世界中对装备或其组件进行虚拟试验,验证分析装备的功能、性能等是否满足要求。同时,该阶段也可在现实世界中进行装备/组件的部分试验,以对关键参数得到真实的数据,并同步反馈至数字世界中的虚拟试验,进行数字模型的修正。该阶段通过虚拟实验和部分现实试验的开展,可更好地指导装备及其组件的研制和开发。

3) 装备生产部署阶段。该阶段主要任务是在现实世界中对装备进行批量生产和部署,在未来体系化作战的场景下,装备都是依据作战任务的变化进行按需的部署和使用,对装备的不同组织运用也将对体系效能产生重要的影响。因此,在该阶段,可在数字世界中对装备的组织运用进行虚拟试验,通过模拟多样化的作战任务和场景,得到装备的多种组织运用优化方案,以备装备在未来使用环境中的按需运用。

4) 装备使用维护阶段。该阶段的主要任务是在现实世界中对装备进行使用和维护。同时,通过采集现实世界中装备的环境数据、运行数据、任务数据等驱动数字世界中装备虚体的同步运行。然而,仅仅同步运行不能实现对现实世界装备的提前预测分析和有效运用,因此,在数字世界中,要对装备虚体进行超前的试验。通过超前的试验推演,得到装备的最佳运用和配置参数,并反馈至现实世界中的装备物理实体,使其能够提前获得最优的方案,以较好应对变化

的任务和环境。

2.2 基于数智孪生的装备虚拟试验开展过程

2.1 节给出了装备全周期虚拟试验流程,说明了各个阶段开展虚拟试验的重点和作用。在此基础上,本节进一步给出基于数智孪生的装备虚拟试验开展过程,如图3所示。主要包括虚拟试验构建阶段、虚拟试验运行阶段和试验结果分析阶段。

1) 虚拟试验建模阶段。该阶段首先进行试验任务的制定,说明要开展哪些试验,说明试验目的、试验内容等,并依据试验任务设计相应的试验方案。然后基于试验方案开展被试装备对象的数字建模和虚拟试验环境的建模,并进行集成,为虚拟试验的开展完成准备工作。基于数智孪生的建模必须构建在装备数智模因基础之上,与物理实体装备具有相同的“基因”。在装备全周期虚拟试验的不同阶段,虚拟试验建模的重点也不相同,特别是针对被试装备的数字建模,在全周期的综合论证阶段,被试装备的数字建模为重点,在后续阶段中主要对数字模型进行修改和完善。

2) 虚拟试验运行阶段。该阶段正式开展虚拟试验。在此过程中,被试装备对象将在虚拟环境中运行,并接入现实世界中的装备试验或运行数据。在虚拟试验运行过程中,采集所需的试验数据,并结合现实世界中的装备试验/运行数据进行分析,然后对虚拟试验过程进行控制。同时可以基于虚实交互对现实世界中的装备物理实体的试验/运行进行控制,实现虚实同步。现实世界中,对装备进行部分试验时,通过虚拟试验可更好地实现对现实世界试验的控制优化,缩

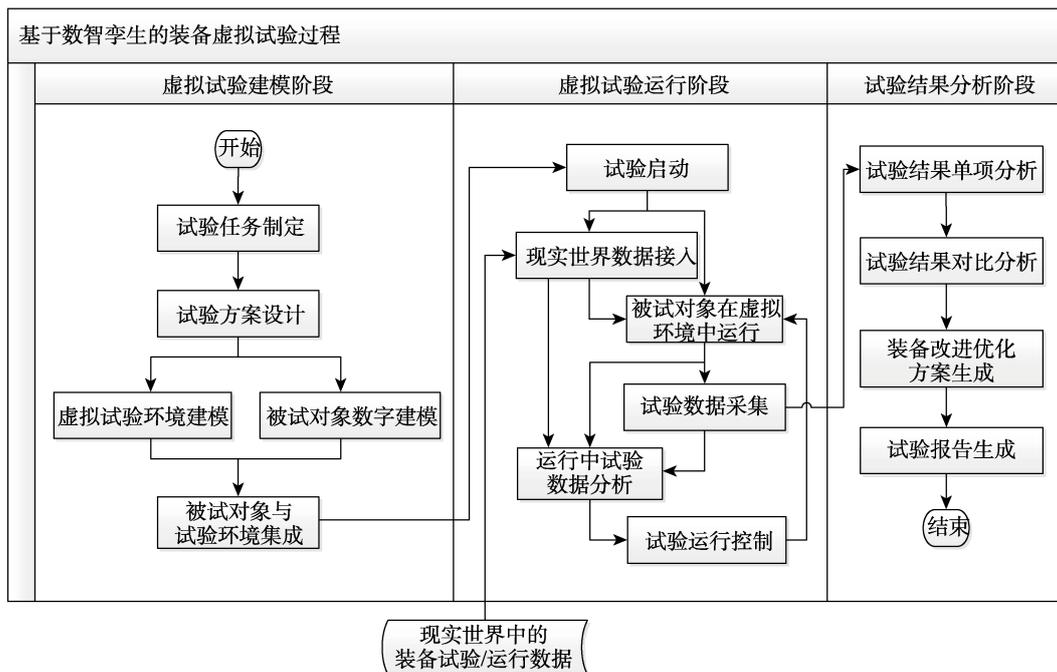


图3 基于数智孪生的装备虚拟试验开展过程

Fig.3 Development process of equipment virtual test based on digital-intelligence twins

短试验周期，控制试验成本，避免过多的试验试错。对装备进行使用维护时，通过虚拟试验可以提前获得装备的优化组织运用和参数配置方案，最大化发挥装备的使用效能。

3) 试验结果分析阶段。该阶段通常在试验结束后进行，基于虚拟试验数据和现实试验数据，对装备进行多维度、对比式的分析，得到装备的改进优化方案，并生成试验报告。然而，在基于数智孪生的装备虚拟试验中，该阶段也会在试验运行中开展，特别是针对全周期过程中装备的使用和维护阶段。

3 虚拟试验环境构建与运行机理

虚拟试验的运行需要有虚拟环境的支撑，基于数智孪生的思想，虚拟试验环境需参考现实世界中的装备试验或运行环境，在数字世界中进行构建并运行。如图 4 所示，数字世界的虚拟试验既可以独立运行和实施，也可以与现实世界的孪生装备相互作用，共同完成实验/作战任务。在现实世界中，被试装备在试验或真实环境中通过与陪试装备进行交互，完成运行试验或作战任务。因此，在虚拟环境构建时，首先基于试验/作战任务，利用虚拟试验规划设计系统进行试验的规划设计，形成虚拟试验方案，然后将方案中

涉及的被试装备和陪试装备的虚体进行构造，并在虚拟试验环境/平台上集成。虚拟试验管理控制系统进行试验的运行和管控，通过将试验方案下发至数字世界中的虚拟试验环境/平台，驱动试验运行，并在试验过程中，接受现实世界的装备实时运行数据以及数字世界中的虚体试验运行数据，然后对数字世界的虚拟试验下发试验管控命令，对现实世界中的装备下发试验/运行管控命令。

每次试验都会产生大量的孪生数据，这些数据是对装备虚拟试验进行控制、分析的重要依据。如何利用大数据、人工智能等技术对试验数据进行采集、抽取、引接、报送、审核、汇聚等处理分析，挖掘这些数据价值，使得虚拟试验能够相对于物理试验更敏捷、更超前地验证装备特性，这是实现数智融合的关键所在，也是利用数智孪生技术更好地开展虚拟试验的重要环节。有效运用产生的孪生数据，一是可以使用 3D 结构模型、流程模型、多物理场模型、GIS 模型、力学模型等解析模型，对被试装备的各项物理特性进行更新、修正、连接和补充，使得虚实孪生体在演进中一直保持高度相近；二是可以分析和检验被试装备是否符合指标要求，通过深度学习、强化学习、迁移学习、生成对抗网络等方法进行数据分析，提出智能装备改进优化策略。

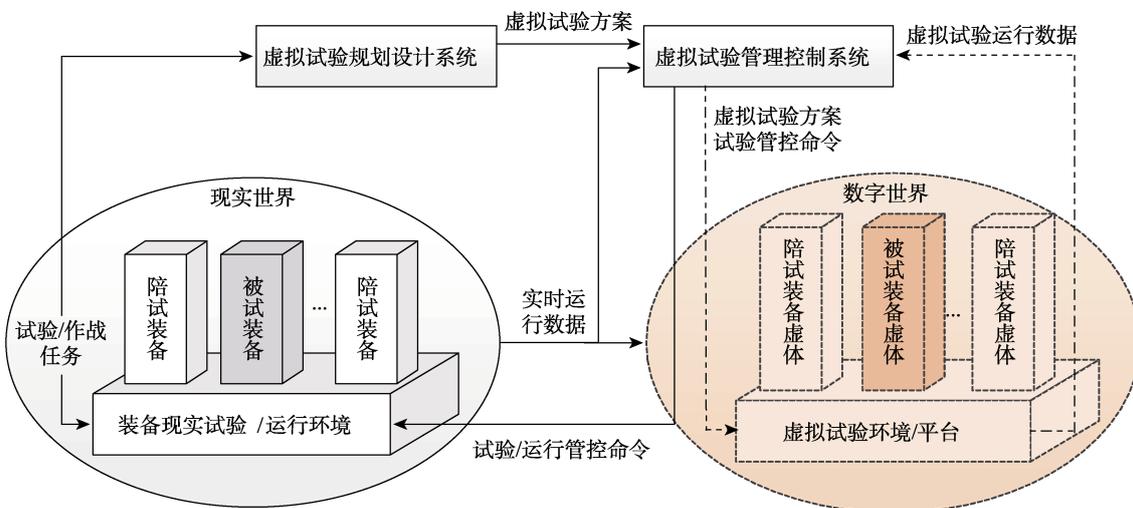


图 4 基于数智孪生的装备虚拟试验环境

Fig.4 Diagram of equipment virtual test environment based on digital-intelligence twins

4 结语

以信息化为特征，智能化为趋势的新军事变革促使装备呈现出信息化、智能化、一体化的发展趋势。随着国际环境复杂性的加剧及竞争越来越激烈，用户对武器装备的性能、任务效能、可靠性、维修性等方面提出了更高的要求。随着武器装备的复杂性和先进性的大幅提高，使得装备试验的要求和难度也随之增加，在一定程度上造成试验费用的增加和试验时间

的延长，甚至由于实物试验的种种条件限制，有些试验项目将无法开展^[6]。因此，虚拟试验技术被大家广泛关注，并已大量用于国外武器装备的采办过程中。从系统方案论证到使用训练的各个阶段，在降低技术风险、缩短研制周期、降低费用等方面取得很好的效果，已成为与实物试验并举的一种新的试验形式。

文中将数智孪生技术应用至装备虚拟试验，提出了基于数智孪生的装备敏捷试验框架，给出了面向装备全寿命周期的虚拟试验流程，阐述了基于数智孪生

的虚拟试验环境构建与运行机理,形成了基于数智孪生的装备全周期敏捷试验技术。通过将数智孪生技术与虚拟试验技术进行融合,不仅可以进一步缩短装备试验周期,降低装备试验的成本和技术风险,还能极大提高虚拟试验的快速迭代、敏捷适变的能力,促进装备智能化演进升级。基于数智孪生的装备全周期敏捷试验研究刚刚起步,提出了框架性的方法和流程,后期还需要深入开展多项关键技术的研究和突破,并结合更多领域和具体场景进行深入探讨和实践。

参考文献:

- [1] 李当当, 李传日. 电子产品虚拟试验评估技术综述[J]. 装备环境工程, 2009, 6(4): 64-67.
LI Dang-dang, LI Chuan-ri. Overview of virtual testing and qualification of electronic products[J]. Equipment environmental engineering, 2009, 6(4): 64-67.
- [2] 杨文芳, 陈竹梅, 张敬莹. 电子装备结构性能虚拟试验技术研究[J]. 中国电子科学研究院学报, 2019, 14(11): 1188-1193.
YANG Wen-fang, CHEN Zhu-mei, ZHANG Jing-ying. Research on virtual test technology of structural performance for electronic equipment system[J]. Journal of China academy of electronics, 2019, 14(11): 1188-1193.
- [3] 吕颂. 基于 PLM 工业软件的工程科研虚拟试验技术研究[J]. 中国设备工程, 2020, 3(1): 224-225.
LV Song. Research on virtual experiment technology of engineering scientific research based on PLM industrial software[J]. China equipment engineering, 2020, 3(1): 224-225.
- [4] 朱蕾, 王连杰, 许明, 等. 装备环境适应性仿真技术的发展思路探讨[J]. 装备环境工程, 2007, 4(3): 91-97.
ZHU Lei, WANG Lian-jie, XU Ming, et al. Consideration for the development of environmental worthiness simulation technology[J]. Equipment environment engineering, 2007, 4(3): 91-97.
- [5] 江东. 虚拟试验技术及其在车辆工程中的应用[J]. 现代制造技术与装备, 2016(9): 132-133.
JIANG Dong. Virtual test technology and its application in vehicle engineering[J]. Modern manufacturing technology and equipment, 2016(9): 132-133.
- [6] 曹建国. 航空发动机仿真技术研究现状、挑战和展望[J]. 推进技术, 2018, 39(5): 961-970.
CAO Jian-guo. Status, challenges and perspectives of aero-engine simulation technology[J]. Journal of propulsion technology, 2018, 39(5): 961-970.
- [7] 赵保平, 严超, 孟祥男, 等. 大型热环境试验技术的最新进展[J]. 装备环境工程, 2016, 13(5): 1-9.
ZHAO Bao-ping, YAN Chao, MENG Xiang-nan, et al. Recent development and prospect of large spacecraft thermal environmental test technology[J]. Equipment environment engineering, 2016, 13(5): 1-9.
- [8] 庄福建, 陈普会. 纤维增强复合材料层合结构虚拟试验技术[J]. 航空科学技术, 2019, 30(10): 1-15.
ZHUANG Fu-jian, CHEN Pu-hui. Virtual testing of fiber reinforced composite laminated structures[J]. Aeronautical science & technology, 2019, 30(10): 1-15.
- [9] Office of the Deputy Assistant Secretary of Defense for Systems Engineering. Department of defense digital engineering strategy[EB/OL]. 2018.06. https://sercuarc.org/wp-content/uploads/2018/06/Digital-Engineering-Strategy_Approved.pdf.
- [10] 肖飞, 张为华, 王东辉, 等. 数字孪生驱动的固体发动机总体设计体系架构与应用[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(6): 1405-1418.
XIAO Fei, ZHANG Wei-hua, WANG Dong-hui, et al. System architecture and application for overall design of solid rock motor based on digital twin[J]. Computer integrated manufacturing systems, 2019, 25(6): 1405-1418.
- [11] 周有城, 武春龙, 孙建广, 等. 面向智能产品的数字孪生体功能模型构建方法[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(6): 1392-1404.
ZHOU You-cheng, WU Chun-long, SUN Jian-guang, et al. Function model construction based on digital twin for intelligent products[J]. Computer integrated manufacturing systems, 2019, 25(6): 1392-1404.
- [12] 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.
ZHUANG Cun-bo, LIU Jian-hua, XIONG Hui, et al. Connotation, architecture and trends of product digital twin[J]. Computer integrated manufacturing systems, 2017, 23(4): 753-768.
- [13] 王昊琪, 李浩, 文笑雨, 等. 基于数字孪生的产品设计过程和工作量预测方法[J/OL]. 计算机集成制造系统, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20200506.1719.008.html>.
WANG Hao-qi, LI Hao, WEN Xiaoyu, et al. Digital twin-based product process and the design effort prediction method[J/OL]. Computer integrated manufacturing systems, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20200506.1719.008.html>.
- [14] 丁凯, 张旭东, 周光辉, 等. 基于数字孪生的多维多尺度智能制造空间及其建模方法[J]. 计算机集成制造系统, 2020, 25(6): 1491-1504.
DING Kai, ZHANG Xu-dong, ZHOU Guang-hui, et al. Digital twin-based multi-dimensional and multi-scale modeling of smart manufacturing spaces[J]. Computer integrated manufacturing systems, 2020, 25(6): 1491-1504.
- [15] 陶飞, 张贺, 戚庆林, 等. 数字孪生十问: 分析与思考[J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26(1): 1-17.

- TAO Fei, ZHANG He, QI Qing-lin, et al. Ten questions towards digital twin: Analysis and thinking[J]. Computer integrated manufacturing systems, 2020, 26(1): 1-17.
- [16] 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.
- TAO Fei, LIU Wei-ran, ZHANG Meng, et al. Digital twin five-dimensional model and ten major applications[J]. Computer integrated manufacturing department, 2019, 25(1): 1-18.
- [17] 曹江, 陈彬, 高岚岚, 等. 体系工程“钻石”模型与数智孪生[J]. 科技导报, 2020, 38(21): 6-20.
- CAO Jiang, CHEN Bin, GAO Lan-lan, et al. System engineering "Diamond" model and digital intelligence twin[J]. Science and technology review, 2020, 38(21): 6-20.
- [18] 曹江. 超前推演的战争[J]. 舰船知识, 2019(7): 20-25.
- CAO Jiang. A war of advance deduction[J]. Ship knowledge, 2019(7): 20-25.
- [19] DoD Deputy Chief Information Office. DoD Architecture Framework Version 2.02[EB/OL]. 2010.08 http://cio-nii.defense.gov/sites/dodaf20/products/DoDAF_v2-02_web.pdf.
- [20] CAO Jiang, FAN Zhi-qiang, GAO Lan-lan, et al. An information-dominated and capability-oriented architecture development methodology for net-info centric systems[J]. Proceedings of IEEE international symposium on system engineering, 2016, 196: 240-245.
- [21] REUSSNER R H. 软件架构建模和仿真: Palladio 方法[M]. 李必信译. 北京: 机械工业出版社, 2018.
- REUSSNER R H. Software architecture modeling and simulation: Palladio method[M]. LI Bi-xin, Translated. Beijing: Machinery Industry Press, 2018.