

7-15-2024

Digital Application of Equipment System Test and Evaluation Based on Digital Twin and Parallel Experiment Theory

Hongjie Dang

*Beijing Institute of Tracking and Telecommunication Technology, Beijing 100094, China,
youyouzi2324@sohu.com*

Wenguang Yu

Beijing Institute of Tracking and Telecommunication Technology, Beijing 100094, China

Huahui Yang

Beijing Institute of Tracking and Telecommunication Technology, Beijing 100094, China

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation. For more information, please contact xtfzxb@126.com.

Digital Application of Equipment System Test and Evaluation Based on Digital Twin and Parallel Experiment Theory

Abstract

Abstract: With the development of equipment systematization, traditional test with real equipment can not meet the requirements of Test and Evaluation(T&E), especially for complex equipment. As the main digital methods in current, digital twins and parallel experiments can support the digital application in the field of equipment Test and Evaluation. This paper makes a comparative analysis of the two digital technology means, extracts their technical connotation and characteristics, and then integrates them to explore the application mode, application time and application occasions in the field of equipment T&E. Taking the satellite for example, by constructing the digital architecture of equipment system T&E based on digital twin and parallel tests, the feasible digital application scheme is designed. The confidence and reliability of the digital model in the equipment system test and evaluation model library are verified through two typical test scenarios. Furthermore, it provides data support for the future on-orbit mission embodiment design and performance evaluation and provides an overall idea for the development of equipment system T&E.

Keywords

equipment system, test and evaluation (T&E), digital twin; parallel experiment theory, digital applications

Recommended Citation

Dang Hongjie, Yu Wenguang, Yang Huahui. Digital Application of Equipment System Test and Evaluation Based on Digital Twin and Parallel Experiment Theory[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(7): 1729-1736.

基于数字孪生与平行试验的装备体系试验鉴定数字化应用

党宏杰, 余文广, 杨华晖

(北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094)

摘要: 随着装备体系化发展, 传统的实装试验手段越来越无法满足复杂装备的试验鉴定要求。数字孪生和平行试验作为目前主要的数字化方式, 可为装备试验鉴定领域数字化应用提供支撑。对两种数字化技术手段进行对比分析, 提炼二者的技术内涵和特点将其进行融合, 探索数字化技术手段在装备试验鉴定领域的应用模式、应用时机和应用场合。以卫星装备为例, 通过构建基于数字孪生与平行试验的装备体系试验鉴定数字化架构, 设计具有可行性的数字化应用方案, 并利用两个典型试验场景验证装备体系试验鉴定模型库中各数字模型的置信度和可靠性, 为后续在轨任务实施方案设计及性能鉴定提供数据支撑, 并为装备体系试验鉴定的发展提供总体思路。

关键词: 装备体系; 试验鉴定; 数字孪生; 平行试验; 数字化应用

中图分类号: TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2024)07-1729-08

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.23-0433

引用格式: 党宏杰, 余文广, 杨华晖. 基于数字孪生与平行试验的装备体系试验鉴定数字化应用[J]. 系统仿真学报, 2024, 36(7): 1729-1736.

Reference format: Dang Hongjie, Yu Wenguang, Yang Huahui. Digital Application of Equipment System Test and Evaluation Based on Digital Twin and Parallel Experiment Theory[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(7): 1729-1736.

Digital Application of Equipment System Test and Evaluation Based on Digital Twin and Parallel Experiment Theory

Dang Hongjie, Yu Wenguang, Yang Huahui

(Beijing Institute of Tracking and Telecommunication Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: With the development of equipment systematization, traditional test with real equipment can not meet the requirements of Test and Evaluation(T&E), especially for complex equipment. As the main digital methods in current, digital twins and parallel experiments can support the digital application in the field of equipment Test and Evaluation. This paper makes a comparative analysis of the two digital technology means, extracts their technical connotation and characteristics, and then integrates them to explore the application mode, application time and application occasions in the field of equipment T&E. Taking the satellite for example, by constructing the digital architecture of equipment system T&E based on digital twin and parallel tests, the feasible digital application scheme is designed. The confidence and reliability of the digital model in the equipment system test and evaluation model library are verified through two typical test scenarios. Furthermore, it provides data support for the future on-orbit mission embodiment design and performance evaluation and provides an overall idea for the development of equipment system T&E.

Keywords: equipment system; test and evaluation (T&E); digital twin; parallel experiment theory; digital applications

收稿日期: 2023-04-13 修回日期: 2023-06-13

第一作者: 党宏杰(1983-), 女, 助理研究员, 硕士, 研究方向为试验鉴定仿真评估。E-mail: youyouzi2324@sohu.com

0 引言

近年来,随着装备越来越先进、越来越复杂、越来越昂贵,体系化运用、实战化考核的要求越来越突出,完全依靠实装开展试验已经无法满足大型复杂装备鉴定定型的需求,迫切需要利用数字化手段来增加试验子样、完善试验要素、模拟实战环境,以数实结合的方式充分开展试验。数字孪生和平行试验作为目前主流的数字化手段,由于其底层采用的建模仿真等技术有一定的相通性,导致二者内涵和外延存在一定的混淆,进而在应用领域和应用方向上的理解见仁见智。本文基于准确把握数字孪生和平行试验的概念内涵,结合试验鉴定领域的数字化需求及数字试验特点,探索数字化技术手段在试验鉴定领域内的应用模式,为推动其在试验鉴定领域的有效应用提供总体思路。

1 概念内涵

1.1 数字孪生的概念

“孪生”概念起源于1969年美国的阿波罗计划,美国NASA通过制造两个完全相同的航天器,形成“物理孪生”。留在地面上的航天器被称为“孪生体”,需全程参与训练,尽可能精确地反映和预测航天器在地外空间执行任务的状态,辅助进行任务分析和决策,这成为了孪生思维的雏形^[1]。

1992年,耶鲁大学David Gelernter在其著作《Mirror Worlds》中描述了软件定义的虚拟现实世界,虽没明确提出数字孪生这一名词,但软件定义的虚拟现实世界,被认为是数字孪生的思想内涵。

2003年,密歇根大学Micheal Grieves教授提出了“镜像空间模型(mirrored space model, MSM)”,他认为通过物理设备的数据,可以构建产品全寿命周期的数字化信息,实现了从实体向数字化模型转变,Grieves教授的这一理论被认为是数字孪生的起源^[2]。

2010年,美国NASA发布的《建模、仿真、信息技术与处理》路线图,给出了数字孪生的四大应用场景,即通过数字孪生预测飞行器任务执行情况、对飞行器的实际飞行状态进行仿真、对潜在灾难和损坏事件进行分析诊断、对未考虑的修改飞行任务参数的影响进行研究,该路线的提出使得数字孪生有了较大发展。

2012年,NASA的Glaessgen和美国空军Stargel发表了名为《The Digital Twin Paradigm for future NASA and U.S. Air Force Vehicles》的文章,完整深入地论述了未来航空航天器数字孪生的理想模型,并首次明确了数字孪生这一概念:数字孪生是飞行器或系统集成的多物理、多尺度的概率性仿真,利用高精度物理模型、新型传感器数据和大量历史经验数据等来构建实体飞行器高逼真度的仿真模型,反映更真实的飞行器在轨形态,进一步推动了数字孪生的发展^[3]。

结合上述结论可知,数字孪生是一种用于模拟、仿真、优化、增强物理世界的重要数字化技术手段。

1.2 平行试验的概念

2004年,文献[4]提出了平行系统方法的基本思想、概念和运行的基本框架,探讨了将平行系统应用于复杂系统的管理与控制的可能性,初步形成了平行系统理论的雏形。

平行系统是指利用智能学习、建模仿真等手段,构建与实际系统相似和平行的人工系统,采用计算试验的方法在人工系统中进行大量场景演练,通过人工系统与实际系统的平行执行、演化逼近等,实现对复杂实际系统的管理与控制。

平行试验是基于平行系统的思想,为解决装备体系试验和试验鉴定等工作而提出的一种新型试验管理体系。装备体系平行试验是以现实靶场和人工靶场构成的平行靶场为基础,利用将物理试验和计算试验相结合的手段,对现实靶场进行虚拟建模形成与之平行的人工靶场,实现技术性能测试向体系对抗效能评估的拓展。最终在数字

物理环境平行状态下, 构造一个完备的装备体系试验环境, 从而为复杂试验系统的管理控制提供有效手段。平行试验理论与平行系统理论一脉相承, 是平行系统理论在装备体系试验鉴定领域的应用和拓展^[5]。

2 数字孪生与平行试验的对比分析

数字孪生和平行试验作为实际系统或物理实体的数字表达手段, 其内核都是仿真建模手段, 所涉及到的建模仿真、数据采集、机器学习等领域的关键技术, 有相同之处。但在研究对象和实现方法等方面各有侧重也有所差异。二者相辅相成, 互相渗透, 从不同视角, 共同解决现实世界的相关问题。

2.1 建模原则的差异

数字孪生是以数字化方式创建物理实体的虚拟模型, 即数字孪生体, 并借助实测数据模拟物理实体在现实环境中的行为。它是基于模型的, 靠数据驱动的, 用于预测的实体镜像系统。其内核是对物理实体高保真的数字模型^[6]。数字模型要求与物理实体的几何、物理、行为、规则等多维度多尺度表现出的特征均相符, 因此其模型颗粒度很高。基于这一建模规则, 数字孪生的主要作用: 通过实测数据驱动数字孪生体, 遵照物理实体的实际运行规则, 用更快的时间或更小的成本, 实现孪生体“生长”, 从而预测成品性能与质量, 识别设计缺陷, 完成设计优化及实体的性能预测; 将物理实体的数字孪生体与生产设备、生产过程等其他形态的数字孪生体形成共智关系, 优化生产流程, 提升制造资源使用效率; 结合物联网、大数据等技术, 实时远程监测物理实体运行状态, 提早预测潜在风险, 对物理实体进行健康管理及寿命预测^[7]。

平行试验基于实际系统和人工系统, 其中, 人工系统主要运用代理(agent)方式进行建模, 这种建模方式遵循简单一致原则, 不以逼近实际系统中某单一本体为目的, 而是更侧重实际系统中

众多有着相似特征的本体根据一定的行为特征“涌现”出的一种趋势变化。因此人工系统中的模型要求颗粒度较低, 能够反映出实际系统中本体一定的行为规则, 从而达到对实际系统功能或行为的“等价”即可。基于这一建模规则, 平行系统的主要作用是借助人工系统解决实际系统在一个时间段内无法遍历到所有衍化规律, 从而无法得到所有可能出现的结果的问题^[8]。人工系统通过在数字环境中“生长”和“培育”出一个发展变化趋势与实际系统一致的平行系统, 并通过实际系统中的实测数据不断修正这一平行系统, 通过计算试验来认识等价系统各要素之间, 在正常和非正常状态下的规律和相互作用; 通过比对各种实验方案, 预测实际系统未来的运行状况; 利用人工系统进行在实际系统中无法开展的各种规律下的趋势变化, 探索实际系统解决问题的最优方案, 并对实际系统运行进行优化控制和管理。

2.2 基础设施的差异

数字孪生的基础设施主要由物理实体和描述它的数字镜像组成, 数据是连通物理实体和数字镜像的桥梁, 实现在虚拟空间中实时映射物理实体的行为和状态。

平行试验的基础设施主要由物理子系统、描述子系统、预测子系统、引导子系统、优化子系统等构成, 通过计算试验、平行执行等手段, 以虚拟的人工系统描述、预测、引导物理系统, 使其逼近更优的人工系统, 实现物理系统的优化^[9]。

3 试验鉴定数字化架构设计

平行系统能够基于人工系统生成的大量场景进行试错实验, 最终得到系统最优控制方案。而数字孪生只建立了描述型人工系统, 无法实现充分预测与引导。为更好地通过数字化手段解决试验鉴定复杂装备体系效能评估的难题, 可以将数字孪生与平行系统相融合构建高逼真度的试验鉴定数字模型库。其在装备试验鉴定领域的应用主要体现在3个方面:

<http://www.china-simulation.com>

(1) 构建部件级孪生体，探寻装备能力边界

能力边界是装备性能试验鉴定的前提要素。采用三维立体结构建模设计开发工具软件构建试验鉴定各部组件产品的结构数字孪生体，将部组件单机产品的结构部件、附件等组成部分进行模拟装配，基于结构数字孪生体可在设计阶段进行动态干涉检查、可达性检查等必要工作，验证新条件、新约束情况下的产品能力范围；采用虚拟样机手段构建导航与控制、动力及电气等系统模型库，实现参数关联与映射，生成控制、电气数字孪生模型，通过模拟不同试验环境或试验场景下的指挥控制规则，开展贴近实战条件下典型卫星装备体系效能评估的平行试验，引导完成装备能力探寻^[10]。

(2) 构建全态势孪生体，预测装备故障寿命

构建通用质量特性模型库，包括可靠性参数模型、故障概率模型、故障逻辑模型、环境模型等，为试验鉴定类卫星通用质量特性设计分析提供工具支撑，建立卫星全态势数字孪生体，通过深度学习、自主训练，实现卫星健康状态评估与寿命预测。同时，结合卫星在轨实测数据，驱动卫星数字孪生体进行多维度、全要素、多工况的故障反演与分析诊断，完成故障定位排查，支撑

装备作战试验验证和性能鉴定。

(3) 模拟试验环节，验证装备体系试验能力

为尽可能构建贴近实战化的考核环境，需在试验鉴定数字化架构系统中扩展实战化试验要素。同时，在数字化架构中进行装备体系全要素映射和复杂试验环境构建，同步制定装备对抗规则和体系协同运用规则，再结合实装或装备数字孪生体，开展复杂试验背景下典型装备体系效能评估的计算试验，旨在对装备体系协同运用管理、指挥控制策略等进行验证，为装备效能评估提供全系统全流程的支撑。尤其对于智能化程度高、信息交互复杂的装备(如智能卫星星座)，在开展体系贡献率评估时，通过在平行系统中构建装备体系试验全要素，同步制定装备交战规则、体系协同规则、对抗规则等，完成典型试验场景下的计算试验。基于此种数字孪生与平行试验应用模式的装备在役考核，能够有效丰富试验样本、缩短试验周期、降低试验风险^[11]。

以卫星装备为例，从人工战场环境、虚拟装备体系和计算试验等多个方面，实现物理靶场的赛博扩展，在装备试验阶段全方位支持试验鉴定效能评估，其试验鉴定领域数字化架构设计如图 1 所示。

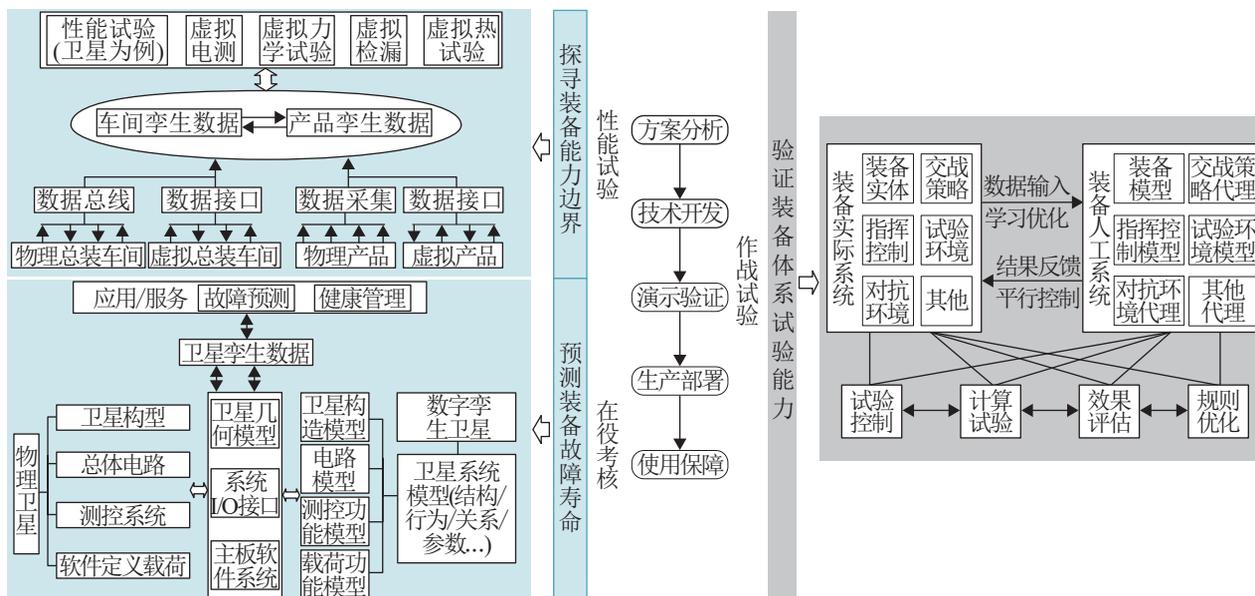


图 1 装备体系试验鉴定领域数字化架构设计图

Fig. 1 Digital architecture of equipment system test and evaluation

http://www.china-simulation.com

4 试验鉴定数字化应用方案

复杂装备试验鉴定迫切需要利用数字化手段来完善试验要素、模拟实战环境, 通过数字化感知、自适应控制、智能决策、自主测试等技术, 突破装备体系传统试验评估手段的局限性^[12]。

以构建某数字卫星为例, 采用基于模型数字孪生的设计理念, 完成导航与控制、动力、结构及电气等分系统建模。随后, 模拟试验任务全过程、在轨故障状态、飞行过程下传遥测参数、接收上注指令等场景, 批量开展卫星在轨任务考核的平行试验验证^[13]。

试验鉴定数字化系统支持超实时和实时运行需求, 模拟卫星在轨的真实接口信息及交互关系, 动力学模型、环境模型、时序等均与真实卫星状态保持一致, 执行机构、传感器、动力学模型在建模时综合考虑了各环节测量误差和外部环境干扰的影响, 通过构建合理的人机交互界面, 根据试验任务需求自适应配置模型参数, 完成控制策略、控制算法的智能决策, 模拟试验鉴定任务全过程, 具体试验鉴定数字化系统框架如图2所示。

利用试验鉴定数字化系统可进行卫星姿态验证、整星模态分析、动力学响应分析、在轨任务推演等各种试验场景的模拟, 以目标观测任务和卫星姿态机动任务为例, 数字化系统中姿轨控模型、测控系统模型、星务模型及观测模型之间具体的交互关系如图3所示。

卫星目标观测任务具体试验流程如下:

- (1) 数字化系统试验初始时刻设为 T_0 ;
- (2) $T_0 \sim T_0+300$ s时, 注入轨道参数, 配置相机模型参数;
- (3) T_0+300 s时, 注入模式切换指令, 转观测模式;

(4) $T_0+1\ 800$ s时, 试验结束, 输出试验结果如图4所示。从图4(b)可以看出: 卫星在转入观测模式后三轴姿态稳定度控制在了 ± 0.05 ($^\circ$)/s, 符合控制要求; 从图4(c)(d)可以看出: 成像相机和观测相机由初始方位调姿指向目标, 高度角和方位角调整后稳定控制在 0° 附近。

卫星姿态机动任务具体试验流程如下:

- (1) 数字化系统试验初始时刻设为 T_0 ;
- (2) $T_0 \sim T_0+300$ s时, 注入轨道参数, 配置姿轨控、相机等模型参数;
- (3) T_0+300 s时, 注入模式切换指令, 转观测模式;
- (4) T_0+500 s时, 注入模式切换指令, 转速率阻尼模式或停控模式;
- (5) T_0+800 s时, 试验结束, 输出试验结果如图5所示。可以看出: 卫星在300 s时转入stage 10进入观测模式, 500 s时按照指令分别切换至速率阻尼模式(stage 1)和停控模式(stage 12)。其中, 按照星务流程, 卫星进入速率阻尼之后自动进入搜索寻日稳定状态。

上述试验分别模拟了目标观测和姿态机动的试验场景, 通过比对经验数据和模型试验结果的匹配程度, 验证了各数字模型的置信度和可靠性, 进而为后续卫星在轨任务实施提供数据支撑。经上述典型试验数字化应用方案可知, 该数字化系统通过构建卫星各设备孪生体模型, 模拟在轨复杂试验场景, 一方面可以指导后续卫星在轨试验方案设计及性能鉴定, 另一方面可以通过实物产品的实测经验数据进一步扩充丰富数字化系统, 构建智能化试验鉴定综合实验平台。

上述内容以卫星装备为例, 其数字孪生和平行试验数字化应用手段同样适用于其他装备。

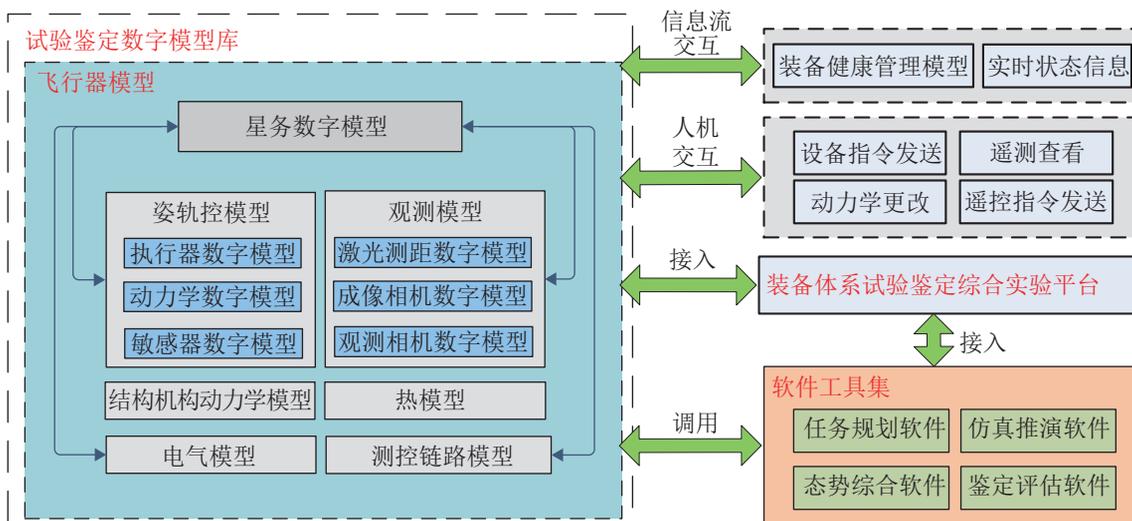


图2 卫星试验鉴定数字化系统框架
Fig. 2 Digital architecture of satellite test and evaluation

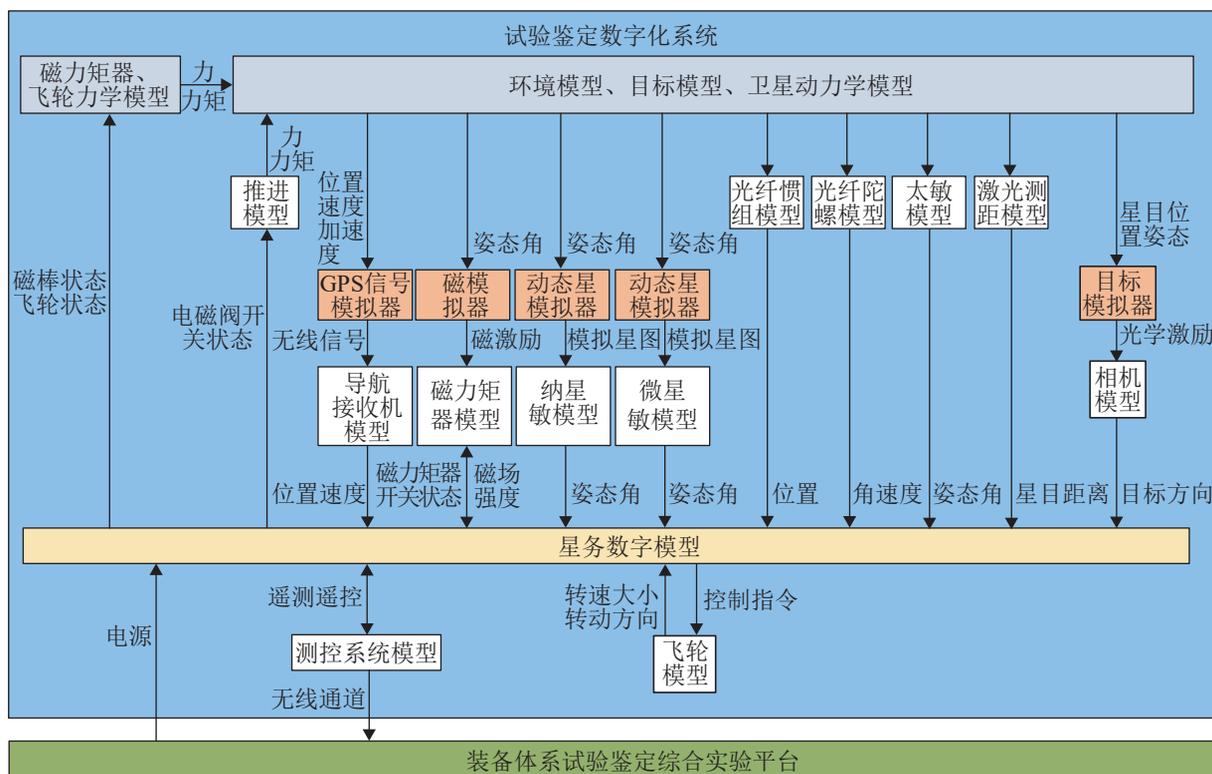
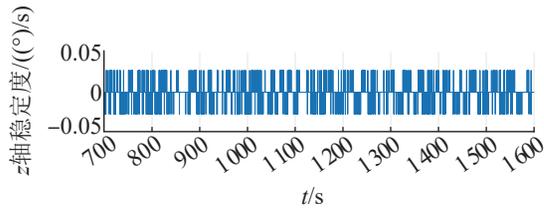
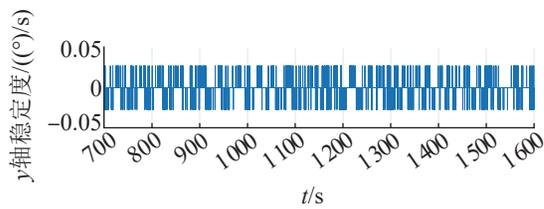
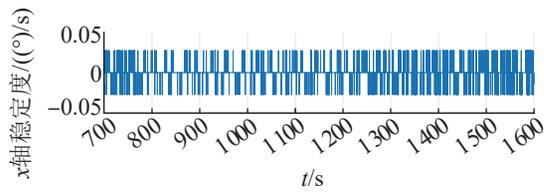
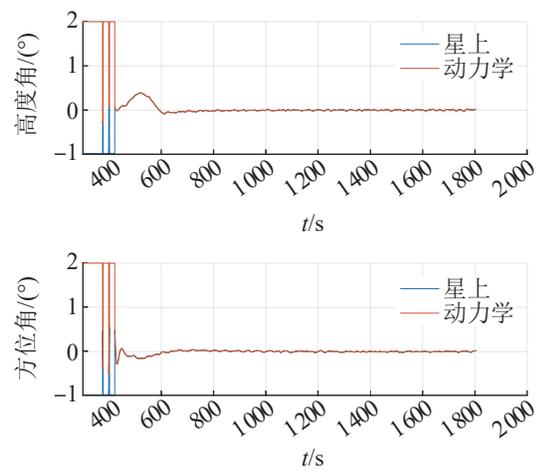
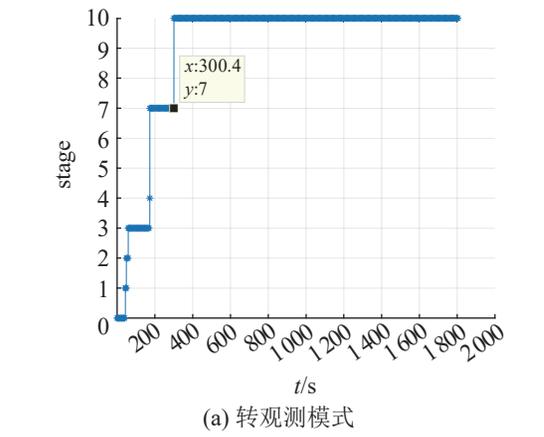


图3 典型试验任务数字化模型交互关系
Fig. 3 Interactive relationship of typical experiment mission digital models



(d) 观测相机高度角和方位角变化情况

图 4 目标观测任务试验结果

Fig. 4 Experiment results of object observation mission

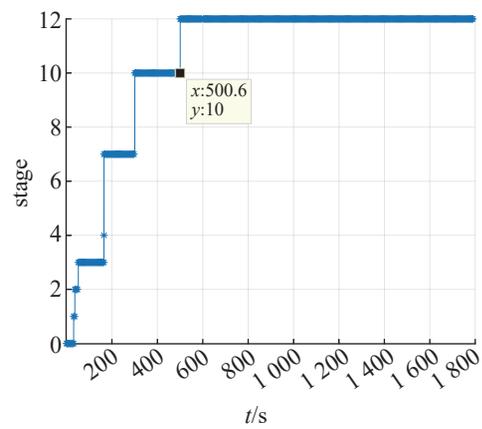
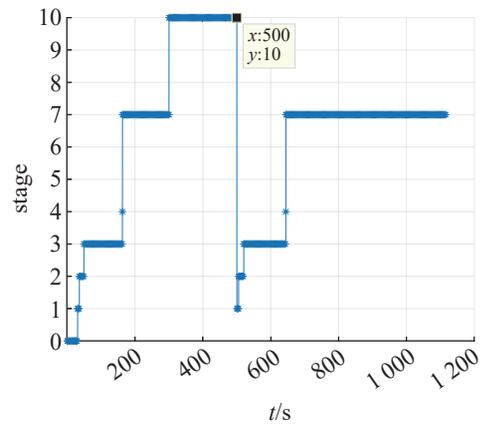
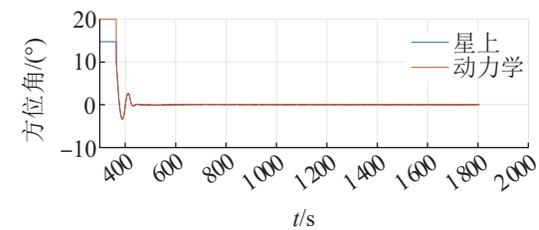
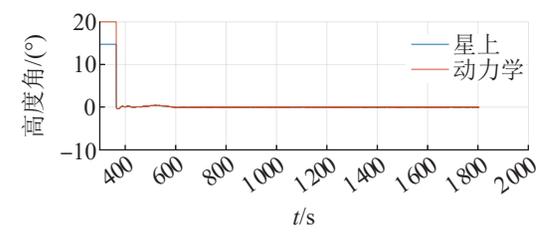


图 5 姿态机动任务试验结果

Fig. 5 Experiment results of attitude maneuver mission

5 结论

本文从数字孪生和平行试验的内涵和应用模式入手,围绕建模原则和基础设施对两者进行了比对分析。结合装备试验鉴定领域应用方向,提出了数字孪生和平行试验相融合的卫星装备试验鉴定领域数字化架构和典型任务场景下的数字化应用方案。结果表明:借助数字孪生和平行试验能够有效支持装备边界能力考核,补充装备体系传统试验评估手段,为装备试验鉴定数字化发展提供可行思路。

参考文献:

- [1] 张霖,陆涵.从建模仿真看数字孪生[J].系统仿真学报,2021,33(5):995-1007.
Zhang Lin, Lu Han. Discussing Digital Twin from Modeling and Simulation[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(5): 995-1007.
- [2] 迈克尔·格里夫斯.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,译.北京:机械工业出版社,2017:74-75.
Grieves M. Virtually Perfect: Driving Innovative and Lean Products Through Product Lifecycle Management [M]. Translated by Fang Zhigang, Zhang Zhenyu. Beijing: China Machine Press, 2017: 74-75.
- [3] Glaessgen E H, Stargel D S. The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U. S. Air Force Vehicles[C]//53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. Reston, VA, USA: AIAA, 2012: AIAA 2012-1818.
- [4] 王飞跃.平行系统方法与复杂系统的管理和控制[J].控制与决策,2004,19(5):485-489,514.
Wang Feiyue. Parallel System Methods for Management and Control of Complex Systems[J]. Control and Decision, 2004, 19(5): 485-489, 514.
- [5] 王晓,要婷婷,韩双双,等.平行车联网:基于ACP的智能车辆网联管理与控制[J].自动化学报,2018,44(8):1391-1404.
Wang Xiao, Yao Tingting, Han Shuangshuang, et al. Parallel Internet of Vehicles: The ACP-based Networked Management and Control for Intelligent Vehicles[J]. Acta Automatica Sinica, 2018, 44(8): 1391-1404.
- [6] 陶飞,张贺,戚庆林,等.数字孪生模型构建理论及应用[J].计算机集成制造系统,2021,27(1):1-15.
Tao Fei, Zhang He, Qi Qinglin, et al. Theory of Digital Twin Modeling and Its Application[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2021, 27(1): 1-15.
- [7] 胡权.数字孪生体:第四次工业革命的通用目的技术[M].北京:人民邮电出版社,2021:190-199.
Hu Quan. Digital Twin: General-purpose Technologies (GPT) of the Fourth Industrial Revolution[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2021: 190-199.
- [8] 曹建平,王晓,贺邓超,等.基于ACP方法的平行战场情报系统[J].指挥与控制学报,2022,8(3):332-340.
Cao Jianping, Wang Xiao, He Dengchao, et al. Parallel Battlefield Intelligence Surveillance and Reconnaissance System Based on ACP Methodology[J]. Journal of Command and Control, 2022, 8(3): 332-340.
- [9] 阳东升,王坤峰,陈德旺,等.平行航母:从数字航母到智能航母[J].指挥与控制学报,2018,4(2):101-110.
Yang Dongsheng, Wang Kunfeng, Chen Dewang, et al. Parallel Carrier Fleets: From Digital Architectures to Smart Formations[J]. Journal of Command and Control, 2018, 4(2): 101-110.
- [10] 张玉良,张佳朋,王小丹,等.面向航天器在轨装配的数字孪生技术[J].导航与控制,2018,17(3):75-82.
Zhang Yuliang, Zhang Jiapeng, Wang Xiaodan, et al. Digital Twin Technology for Spacecraft On-orbit Assembly[J]. Navigation and Control, 2018, 17(3): 75-82.
- [11] 刘蔚然,陶飞,程江峰,等.数字孪生卫星:概念、关键技术及应用[J].计算机集成制造系统,2020,26(3):565-588.
Liu Weiran, Tao Fei, Cheng Jiangfeng, et al. Digital Twin Satellite: Concept, Key Technologies and Applications [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2020, 26(3): 565-588.
- [12] 杨林瑶,陈思远,王晓,等.数字孪生与平行系统:发展现状、对比及展望[J].自动化学报,2019,45(11):2001-2031.
Yang Linyao, Chen Siyuan, Wang Xiao, et al. Digital Twins and Parallel Systems: State of the Art, Comparisons and Prospect[J]. Acta Automatica Sinica, 2019, 45(11): 2001-2031.
- [13] 陶飞,刘蔚然,刘检华,等.数字孪生及其应用探索[J].计算机集成制造系统,2018,24(1):1-18.
Tao Fei, Liu Weiran, Liu Jianhua, et al. Digital Twin and Its Potential Application Exploration[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2018, 24(1): 1-18.