

doi: 10.7690/bgzd.2025.10.001

基于数字孪生的舰载导弹武器装备保障系统构建研究

芦旭, 刘亿, 余鹏飞, 石晓航, 龚喜
(海军大连舰艇学院导弹与舰炮系, 辽宁 大连 116000)

摘要: 针对舰载导弹武器装备的数字化保障议题, 聚焦于当前海军舰载导弹武器装备的保障需求, 以及数字孪生的保障技术特点, 探讨相关技术的发展方向, 以更好地保障海军装备需求。结果表明, 该研究可为舰载导弹武器装备的可靠性提供有潜力的研究方向。

关键词: 数字孪生; 装备保障; 数据分析; 仿真技术

中图分类号: TJ76 **文献标志码:** A

Research on Shipborne Missile Weapon Equipment Support System Construction Based on Digital Twin

Lu Xu, Liu Yi, Yu Pengfei, Shi Xiaohang, Gong Xi
(Department of Missile and Shipborne Gun, PLA Dalian Naval Academy, Dalian 116000, China)

Abstract: In view of the issue of digital support of shipborne missile weapon equipment, this paper mainly focuses on the current support requirements of naval shipborne missile weapon equipment and the characteristics of digital twin support technology, and then discusses the development direction of related technologies, in order to better support the requirements of naval equipment. The results show that the research can provide a potential research direction for the reliability of shipborne missile weapon equipment.

Keywords: digital twin; equipment support; data analysis; simulation technology

0 引言

数字孪生是一种将数字信息转换成可视化图像并进行辅助数据分析的技术^[1-2]。该技术利用计算机模拟出真实世界中的场景, 以及人类在其中的行为, 并进行相应的操作和控制^[3], 不仅能够为实际物体提供更加准确的数据支持, 而且能实现物体的在线可视化、行为模拟和运营管理等功能, 在数字化转型领域发挥着重要的作用^[4-7]。

传统装备保障存在资源浪费、繁琐的管理流程和高昂的维护成本等缺陷^[8]。许多学者已经开始探索如何利用数字孪生技术搭建演示系统及仿真建模, 对装备进行全寿命周期的预测^[9-11], 并通过仿真推演、智能匹配等辅助手段来保障装备可靠性和稳定性^[12-16]。

笔者探讨了基于数字孪生技术的舰载导弹武器装备保障需求及相关技术流程: 首先, 结合舰载导弹武器装备的基本特征进行了需求分析; 其次, 从不同方面介绍了数字孪生保障系统的组成基本特点以及要素应用方式; 最后, 讨论了数字孪生保障系统运行模式及应用场景, 结合数字孪生不同模型特点提出了舰载导弹武器装备保障策略。

1 舰载导弹武器装备保障的需求分析

舰载导弹武器装备是装备在舰船上的武器系统, 其主要作用是防御和反击, 用于攻击地面、海面和空中的目标, 能实现对敌作战功能的多个要素综合管理, 包括预警、跟踪、目标识别、数据处理、威胁估计、武器控制及毁伤评估等。也可以帮助舰船人员合理控制武器, 有效应对敌方攻击, 保护舰船安全。舰载导弹武器装备组成通常有雷达、照射系统、光学跟踪系统、供电系统、武控系统、发控系统、箱弹以及发射装置。

舰载导弹武器装备作为技术密集型装备, 需要在装备研制、生产、运行和维修等方面使用各种新技术、新材料、新工艺和新方法, 以提高装备性能; 同时, 也造成了舰载导弹武器装备复杂程度高、保障难度大等问题。传统舰载导弹武器装备保障方法主要包括: 1) 定期对设备进行检查和维护, 以预防设备故障的预防性维护; 2) 设备出现故障时, 进行修复和维护的故障修复; 3) 维护一定数量的备件库存, 在设备故障时更换使用库存的备件管理; 4) 对设备进行巡检, 以发现潜在故障和问题的定期人工

收稿日期: 2024-10-06; 修回日期: 2024-11-02

基金项目: 海军大连舰艇学院科研发展基金资助 (DJYKYKT2022-034)

第一作者: 芦旭 (1982—), 男, 辽宁人, 博士。

巡检。这些保障方法主要依赖于人工经验和主观判断,存在时效性差、兼顾性弱等问题。难以满足高新技术集成化、模块化的新型舰载导弹武器装备保障的需求。

2 数字孪生保障系统的组成及要素

2.1 系统组成

构建数字孪生舰载导弹武器装备保障系统需要结合预置参数对设备所处环境、运行状态进行实时感知、监测及采集,以传感器监测系统和设备测试设施为基础建立保障系统物理空间。将采集的数据通过高效的数据网络进行信息传递,在后台数据库中建立与物理空间对应的数字虚拟空间,结合人机一体化智能分析决策系统进行任务规划,实现最优调配,如图 1 所示。

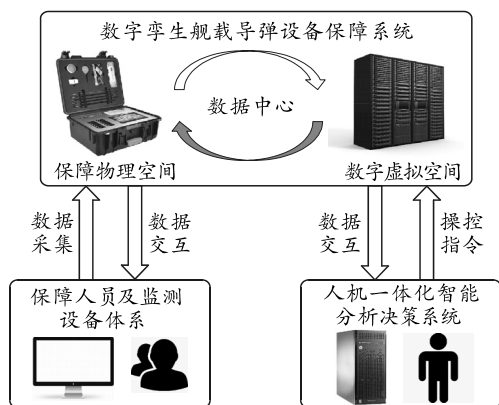


图 1 舰载导弹武器装备数字孪生保障系统

这一阶段中,需要对舰载导弹武器装备保障流程中的关键节点进行梳理,涵盖舰载导弹武器装备主要参数、状态等关键数据及相关战技、战术指标等要求来落实保障系统的主要功能,主要体现在:

1) 舰载导弹武器装备在生产、运输、安装、使用以及保障性工作时,通过数据采集系统进行各类数据的分类和汇总,结合 AI 智能学习和人为干预可以达到实时映射物理空间场景的状态。

2) 保持数据的实时同步性,即现实场景中某个参数发生变化,在虚拟空间中与之对应的参数同步改变,保证数字模型能够实时、动态更新并真实反映物理空间特征。

3) 结合大数据处理、云空间存储等技术手段,对历史数据进行学习并且结合实时传输数据进行装备保障任务规划设计,实现资源最优调配。减少设备故障,降低设备维护费用,提高设备可靠性。

4) 保障智能体系在运行中实时产生的数据庞大、速度快,需要构建不同的任务规划决策模型对

这些繁杂的历史数据进行收集并分类整理,进行高价值密度数据提取,使用机器智能学习方法进行训练,提升模型对物理保障空间的认知程度,构建出具有灵活性、适应性的数字孪生体,降低设备保障的冗繁程度及过饱和程度,实现保障过程智能化。

2.2 保障系统要素组成及应用

舰载导弹武器装备保障系统是保障设备运行稳定性和可靠性的重要措施。数字孪生技术可对装备进行全生命周期的数字化管理,包括设计、制造、运营和维护等要素及其过程应用。要素可分为:

1) 预测性维护:建立舰载导弹武器装备的数字孪生模型,通过模拟输入真实数据,对未来运行状态进行预测并及时进行维护,减少停机时间和成本,提高战场反应灵敏度。

2) 实时监测与远程维护:数字孪生技术通过实时监测舰载导弹武器装备运行状态和性能数据,实现在线监测和远程维护,缩短维修反应时间,降低维修成本和风险。

3) 自适应控制:基于数字孪生模型分析装备数据,并实时自动对装备进行控制,提高装备的运行效率和稳定性,降低成本和资源浪费,提升远洋作战能力。

4) 仿真模拟:建立数字孪生模型对装备进行仿真模拟,分析舰载导弹武器装备在不同操作条件下的运行情况,预测装备未来运行状态,优化装备性能和有效性,还可以为我军实战演训提供操作平台,提升单舰作战及多舰协同作战能力。

5) 数据分析:通过深入分析装备数据,诊断和修复故障,优化装备运行,预测未来行为,提高装备效率和可靠性。

此外,数字孪生技术还可以通过数据分析建立备件需求预测模型、备件库存优化模型、备件领用管理系统和备件质量控制,实现备件管理全过程数字化,降低备件短缺和过剩的风险,提高备件利用率和效益。在装备确需维修状态下,通过数字孪生保障系统自动发放备件领用申请,实时监测备件领用和归还情况,避免备件丢失和误用的风险,判断备件使用寿命和质量状况,及时维修和替换备件,保证舰载导弹武器装备安全性和可靠性。

3 运行模式及应用保障策略

3.1 数字孪生保障系统运行模式

基于数字孪生的舰载导弹武器装备保障系统主要依托于数据链传递以及任务决策实施。在时间维

度上，需要与舰载导弹武器装备的研发、制造、运输、安装、运行及维修保养等环节同步；在空间维度上，需要能够支撑舰载导弹武器装备保障系统状态监测、试验分析、运行维护、训练保障等保障类

服务的开展。在数据库中形成一个“数据感知→集成分析→结果展示→智能决策→规划实施→数据感知”的任务规划实施循环模式，如图 2 所示，该模式可以映射出物理空间装备中的数字孪生保障系统。

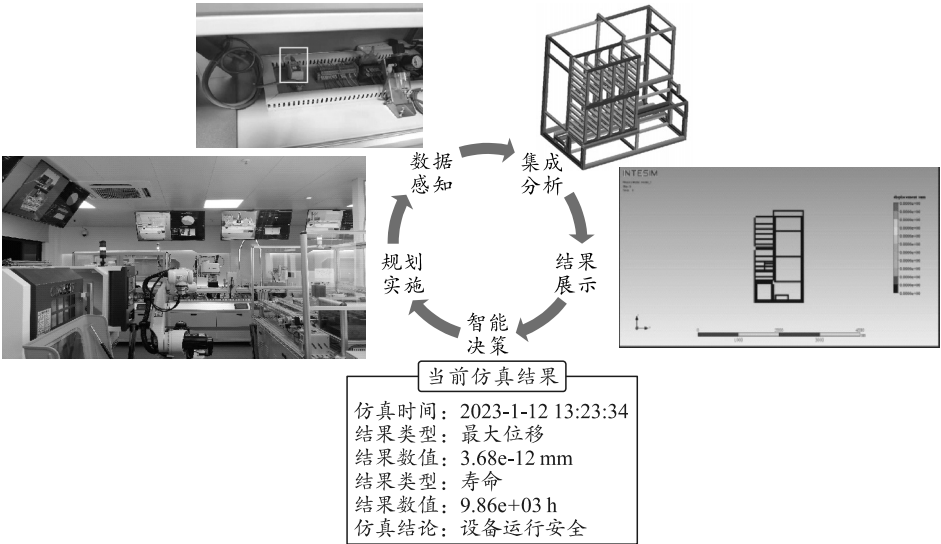


图 2 任务规划实施循环模式

在该循环模式下数据感知主要通过装备在物理空间中的数据采集设备，如传感器、图像采集器以及遥感遥测等手段对舰载导弹武器装备状态数据进行采集录入。数据传输依靠局域网或者 5G 互联网高速传输到数据中心，通过滤波、拟合等数据处理方式传递到云端数据处理中心进行实时诊断分析，同时根据不同需求以不同格式存储到数据库中。分

析优化后的数据通过可视化系统显示到移动端 APP、屏幕等显示终端，在不同维度显示设备与物理空间的运维状态。对于云端数据处理中心存储的历史数据，参照实时数据进行关联、发掘、钻取等操作，对不同时间、空间层次的信息进行融合分析，最终与物理空间的其他相关数据一起进入可视化系统实现面板显示，如图 3 所示。

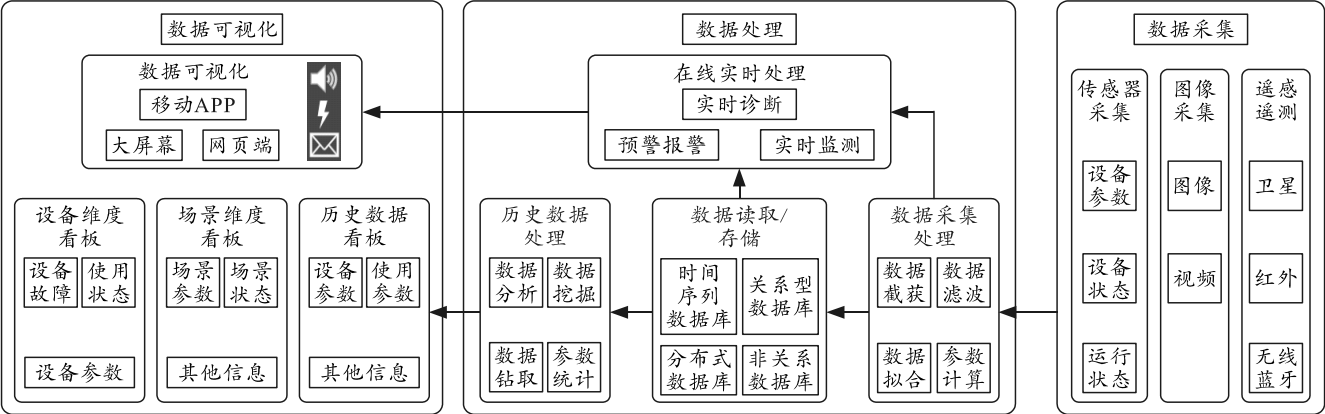


图 3 数据采集梳理

3.2 数字孪生保障系统应用保障策略

基于数字孪生的舰载导弹武器装备保障系统需要建立在物理空间与数字虚拟空间实时交互基础上，实时交互过程通过数据分析、模型建立和应用规划，实现了数据的采集、存储和分析过程。

数据分析主要借助物理环境下传感器等采集设备进行现场数据的收集。数据分析结合数据库存储

的历史状态和维护数据，构建能够反映实时运行状态和预测健康状况的综合数据库，为系统提供支持。

模型建立是数字孪生保障系统的核心之一，主要负责将数据层所收集到的各项数据进行提炼和整合，进而建立数学模型以支撑装备运行状态的监控和维护。具体而言，模型建立主要包括装备几何模型、物理模型、功能模型和控制模型等，可以通过

对舰载设备的动态行为和运行情况进行精准的建模和预测。不同种类的数字孪生模型需要配合相应的保障策略, 以实现舰载导弹武器装备健康状况的及时评估和调整。据此可以提出基于不同数字模型的保障策略:

1) 基于数字孪生的几何模型是通过舰载导弹武器装备的 3 维建模, 实现对装备外形、结构、尺寸等外观方面的数字化建模。几何模型可以辅助装备保障人员快速了解装备的结构和部件布置, 便于快速诊断问题和维修。同时, 在几何模型中, 缺陷和损伤可以快速定位和测量, 诊断出可能存在的缺陷和损伤, 及时进行维护。面对不同外形结构的设备, 数字孪生系统还可以通过模拟分析和建模技术, 来实现多角度、多方案的预判和诊断。

2) 基于数字孪生的物理模型是基于舰载导弹武器装备物理特性和装备操作特点建立的数字模型。通过建立物理模型可以描述装备等效电路、传感器、执行器、模拟特性和运动轨迹等信息, 便于识别运行故障和畸变。同时利用数字孪生的物理模型, 可以进行虚拟试验和仿真分析, 预测装备的运行状态, 诊断勘察装备的故障并分析其根源, 加速故障处理和维修。也可以根据不同操作场景和使用需求进行相应的模拟和改进, 以优化装备运行保障效果。

3) 基于数字孪生的功能模型是基于舰载导弹武器装备的功能需求和功能操作建立的操作模型。它可以实现舰载导弹武器装备功能的细化和划分, 提供更多的功能细节, 保障人员可以清楚地了解装备的操作流程, 规避操作失误, 提高装备操作效率。通过方向性信息和信号分析, 加快操作和维修决策的流程, 确保保障方案及时有效。应用模拟技术和人机界面技术, 还能够帮助保障人员更好地进行装备的功能培训和指导, 准确快速地提升保障人员技术水平。

4) 基于数字孪生的控制模型是基于舰载导弹武器装备的控制系统和操作需求建立的模型。通过描述控制系统的结构和部件, 实现对控制器的仿真、模拟和测试, 从而提高装备的可靠性和稳定性。协助保障人员了解装备的控制系统和控制器, 加深对装备的控制原理的理解。应用模型中的控制参数和模拟参数, 也可以提高保障人员掌握装备控制、操作和保障技术熟练度。

基于不同数字模型的保障策略, 需要结合实际

使用需求进行优化和验证。同时也需要关注其应用场景和规划要求。

基于数字孪生的舰载导弹武器装备保障系统中, 应用规划是数字孪生保障系统中呈现装备状态和提供决策支持的重要环节。应用规划主要负责将模型层所获得的各项指标和数据展示和分析, 以支撑舰载导弹武器装备的实时监控、维护和修复, 同时兼具指导决策的功能。值得注意的是, 应用规划的前沿技术包括数据挖掘、机器学习、神经网络等, 这些手段可以极大地提高数字孪生保障系统的检测和预警能力, 并通过更快、更准确地反馈指标和数据, 为舰载导弹武器装备的升级改造和优化提供重要的技术支持。

4 结束语

为满足未来作战使用需求, 应对舰载导弹武器装备智能保障技术的新挑战与新要求, 笔者在对舰载导弹武器装备保障需求分析的基础上, 探讨了数字孪生技术在装备智能保障中的组成、运行模式与应用保障策略。

数字孪生技术作为未来数字化装备保障的核心技术之一, 将极大地提高装备保障效率和质量, 同时也会对保障过程中的人力、物力、财力等方面产生积极影响。在数字化装备保障的大背景下, 数字孪生技术更是具备了重要的战略价值和应用前景。同时, 数字孪生技术在应用过程中也面临着各种挑战和风险, 需要不断进行技术研究和实践探索。未来, 应进一步完善数字孪生技术的理论框架和技术手段, 搭建更加完备、高效的装备保障平台, 进一步扩大数字孪生技术在装备保障中的应用范围和深度, 推动数字化装备保障服务向更高层次迈进。

参考文献:

- [1] 王亚彬, 王帅, 王金桐, 等. 基于数字孪生的装备保障关键技术研究综述[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(28): 12233-12241.
- [2] 王帅, 王亚彬, 王金桐, 等. 陆军合成旅典型装备保障系统数字孪生模型[J]. 现代防御技术, 2023, 51(1): 96-106.
- [3] 曹新祥, 郑东良, 俞瑞斌. 数字孪生技术在航空装备智能化保障中的应用研究[J]. 航空维修与工程, 2022(8): 32-34.
- [4] 王亚彬, 王帅, 王金桐. 数字孪生应用于维修器材保障的 SWOT 战略分析[J]. 国防科技, 2022, 43(3): 1-8.