

潜艇作战系统数字孪生体应用需求分析

罗 浩, 张剑锋, 宁云晖, 尤 岳
(海军研究院, 北京 100161)

摘 要 目前潜艇作战系统数字孪生体的有关研究并不多见, 在对数字孪生技术概念内涵进行描述的基础上, 结合潜艇作战系统全寿命周期, 对其数字孪生体的军事应用需求进行了深入分析, 提出了有关应用面临的问题并探讨了解决思路及方法, 可为潜艇作战系统数字孪生体的方案设计提供参考借鉴。

关键词 潜艇作战系统; 数字孪生; 需求分析

中图分类号 TP391.9

文献标识码 A

文章编号 2096-5753(2021)03-0233-05

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2021.03.012

Application Requirement Analysis on Digital Twin of Submarine Combat System

LUO Hao, ZHANG Jianfeng, NING Yunhui, YOU yue
(Naval Research Academy, Beijing 100161, China)

Abstract Nowadays, there are few researches on digital twin of the submarine combat system. Based on the description of the digital twin concept and combined with the life cycle of the submarine combat system, the military application requirement of the digital twin has been deeply analyzed. Problems about the application of digital twin technology have been put forward, and the ideas and methods to solve those problems have been discussed, providing reference for the project design of the digital twin of the submarine combat system.

Key words submarine combat system; digital twin; requirement analysis

1 数字孪生的概念内涵

数字孪生技术被誉为连接制造物理世界和数字虚拟世界的最佳纽带^[1]、有望改变制造业“游戏规则”的顶尖技术^[2], 近年来得到各界广泛关注。美国《航空周刊》预测, “到 2035 年, 当航空公司接收一架飞机的时候, 将同时验收另外一套数字模型, 它就像飞机的一个忠诚的影子, 伴随一生, 从不消失”^[2]。由此, 不难预见, 未来装备交付, 极有可能同步交付对应数字孪生装备。

数字孪生技术的发展与军事应用有着历史渊源。2011 年, 美空军制定未来 30 年长期愿景时,

采纳了数字孪生的概念, 目的是解决飞机运行维护和寿命预测的问题^[3]。美国国家航空航天局 (NASA) 将物理系统与其等效的虚拟系统相结合, 研究了基于数字孪生的复杂系统故障预测与消除方法, 并应用在飞机、飞行器、运载火箭等飞行系统的健康管理中^[4]。美国空军研究实验室与 NASA 合作构建的 F-15 战斗机机体数字孪生, 用于对在役飞机机体结构开展健康评估和损伤预测, 提供预警并给出维修更换指导^[3]。目前, 有关在潜艇作战系统装备上应用数字孪生技术的文献并不多见, 为此本文着重对其应用需求进行了研究和思考。

数字孪生概念的定义有很多,列举3种易于理解的如下:

1) 数字孪生是指在整个生命周期中,通过软件定义,在数字虚体空间中所构建的虚拟事物的数字模型,形成与物理实体空间中的现实事物所对应的在形、态、行为和质地上都相像的虚实精确映射关系^[5]。

2) 数字孪生是物理事物或系统的动态软件模型,它依赖传感器数据理解其状态,对变化做出响应,改进操作,增加价值。包括由元数据(如:分类、组成和结构)、条件或状态(如:位置和温度)、事件数据(如:时间序列)和分析(如:算法和规则)形成的组合^[1]。

3) 数字孪生是以数字化方式创建物理实体的虚拟模型,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^[4]。

对数字孪生具有的虚拟性、多尺度性、层次性、集成性等特点^[5],主要认识如下:

1) 虚拟性。数字孪生属于虚拟空间,是虚拟数字模型。数字化特性决定了使用者可方便地复制数字虚拟事物,使得孪生体易于传播、积累和方便用户使用。

2) 多尺度性。数字孪生体既描述产品的宏观特性(如三维形状),也描述产品的微观特性(如产品某部分更细粒度的微观组成)。

3) 层次性。组成物理实体的不同组件、部件甚至零件等,都可以具有与其对应的数字孪生体。

4) 集成性。数字孪生体是对物理对象多种模型,如结构模型、运动模型、感知模型、信息处理模型、决策模型、行为模型等的多尺度、多层次集成模型,有利于从整体上对产品进行仿真分析。

5) 数据双向传输。在物理实体和与其对应的数字孪生体之间,数据可双向传输。

6) 面向对象的广泛性。孪生体可以是面向新系统,也可以是面向已完成建造的系统,如现役的F-15飞机、数字城市、舰船等各种各样的物理实体。

7) 数字孪生的构建是一个不断持续、精益求精

的过程。数字孪生的构建基于设计阶段生成的物理、功能模型,并在随后的制造和使用阶段,通过与物理实体之间的数据和信息交互,不断提高自身的完整性和精确度,最终实现对物理实体的完全、精确描述。

8) 数字孪生体与物理实体不是单调的一一对应关系^[6]。如美空军和波音公司为F-15C飞机创建的数字孪生体,不同工况条件、不同场景的模型都可以在数字孪生体上加载,每个阶段、每个环节都可以衍生出1个或多个不同的数字孪生体,从而对飞机进行全生命周期各项活动的仿真分析、评估和决策,让其获得更好的可制造性、装配性、检测性和保障性^[7]。

9) 数字孪生体需要人们对其进行维护。数字孪生体与物理实体一样,同样需要人们网络空间中对它不断地进行维护。

2 潜艇作战系统应用需求分析

潜艇作战系统^[8]是装备于潜艇平台上用于执行警戒、跟踪、目标识别、数据处理、威胁估计及武器控制,完成对敌作战功能的各要素及人员的综合体,通常由导航分系统、声呐分系统、导弹分系统、鱼雷分系统、通信分系统、指控分系统、水声对抗分系统、发射装置、雷达设备、光电设备等组成。潜艇作战系统的数字孪生体,是与潜艇作战系统对应的、交互的系统,是在虚拟网络空间构造的与潜艇作战系统匹配的对孪生系统,它实现作战系统全要素的数字化和虚拟化、作战系统全状态可视化,支持对作战系统全寿命周期研发和持续改进工作,其示意图如图1所示。

结合作战系统的全寿命周期来看,按照图2所示需求分析框架,对孪生系统的应用需求分析如下:

1) 系统论证阶段。

在该阶段,需要形成作战系统的初步方案、主要功能和战技术指标要求。该阶段对数字孪生体的需求,是能够支持对作战系统进行多种方案的对比评价,为主要战技指标论证以仿真分析的方式提供支撑,为作战系统装备研发的目标图像提供可视化展示支持。

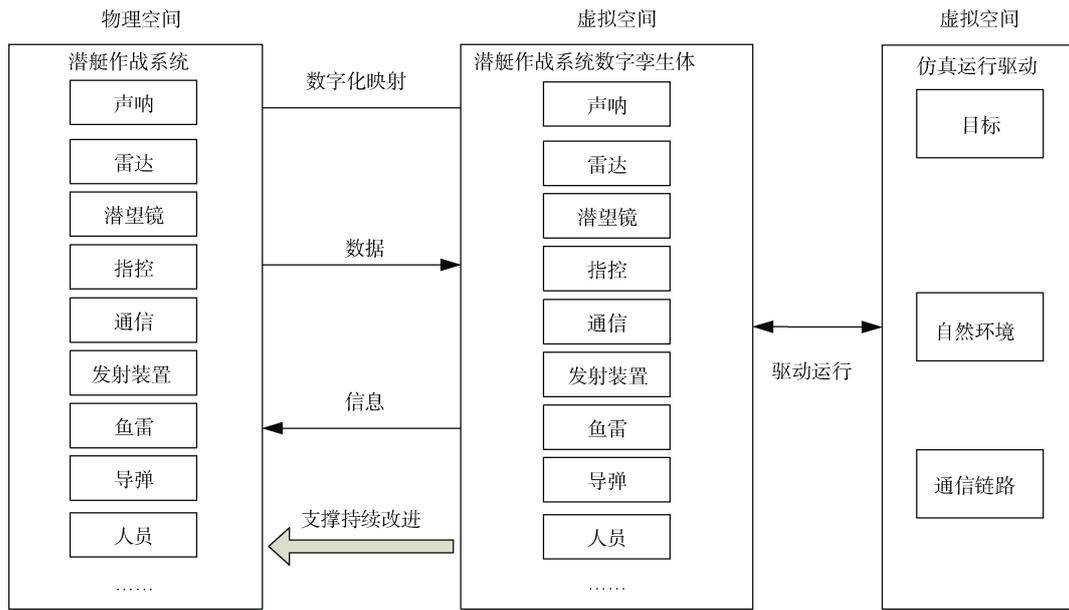


图 1 潜艇作战系统数字孪生体示意图

Fig. 1 Schematic diagram of digital twin of the submarine combat system

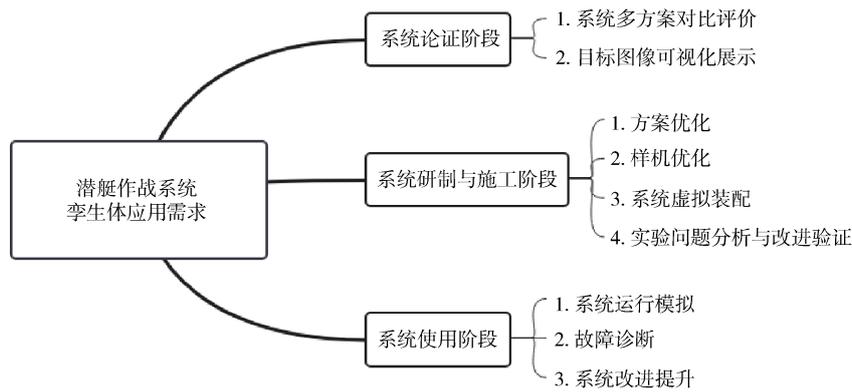


图 2 潜艇作战系统数字孪生体应用需求分析框架

Fig. 2 Need analysis frame for the digital twin of submarine combat system

该阶段如果在从 0 开始的基础上,可以构建较粗仿真粒度的孪生体以满足论证需求,主要原因是该阶段需研制的各装备还未开展详细设计,构建较细仿真粒度的孪生体模型费效比不高。在有其它型号孪生体的基础上,可考虑改进完善有关模型后,用于支持该阶段工作。

2) 系统研制与施工阶段。

在该阶段,作战系统及其分系统、设备需要进行方案设计、技术设计,开展样机试制,并完成随艇试验验证。

该阶段对数字孪生体的需求,是与真实装备共同进化,随着装备设计方案调整而调整,随着

真实装备的产生而产生,随着真实装备的完善而完善。在这个过程中,可以通过仿真测试的方式,不断测试作战系统孪生体在虚拟空间的主要战技术指标,同步优化系统、分系统及设备设计方案及样机。

在作战系统有关装备装配到潜艇前,可以结合潜艇平台的孪生体,支持将作战系统有关孪生体三维模型虚拟地安装到潜艇平台上,推演可能存在的问题,提高系统有关装备的装艇效率,形成数字化虚拟装配^[7]能力。

在试验验证过程中采集的有关数据,可以注入到孪生体中,支持对试验问题的分析,针对该问题

改进孪生体后,在孪生体中能够预先验证是否能够解决。

3) 系统使用阶段。

真实装备交付时,研制单位将同时交付相应的数字孪生装备。用户在使用 的过程中,会产生许多使用过程中的数据,这些数据应支持注入到孪生体中,用于系统运行模拟、故障诊断、系统改进提升等方面。

在系统运行模拟方面,用户可方便地观察作战系统及其分系统、设备运行状态,可深入关心的细节,可统计分析系统电子设备实际工作时间、最大连续工作时间等参数。

在系统故障预测方面,可复现系统故障,辅助分析故障原因,并在孪生体中进行模拟修复以验证是否能够解决有关故障。有效的故障解决方案将提供给用户,便于及时对系统进行维护。

在系统改进提升方面,由于作战系统常结合潜艇修理进行改进,可通过孪生体辅助分析有关设备改进需求,同时根据新技术、新硬件、新算法等改进方案,支持在虚拟空间进行作战系统改进的虚拟实践,对孪生系统改进效果进行测试评估,以支持改进方案决策。在实施装备改进后,实际的作战系统会升级硬件、升级软件,作战系统孪生体应进行同步更新调整。在该方面,数字孪生技术具备解决潜艇作战系统基线式升级发展的潜力,可有效地促进系统持续改进。

3 有关应用问题分析

1) 作战系统与其孪生体的数据交互问题。

潜艇作战系统长期在水下工作,客观上不支持与其孪生体进行实时数据交互。因此,可在潜艇执行任务的过程中全程采集有关数据并完成必要的预处理和压缩,待潜艇完成任务后,再将有关数据注入孪生体,根据需要进行应用分析。为此,在实际的潜艇作战系统运行前,应事先部署好数据采集工作,规划好数据的采集、存储及后续传输工作。

2) 在作战系统上需要采集哪些数据用于注入孪生体。

潜艇作战系统工作的驱动因素主要包括作战系统声呐等传感器的探测数据、人对机器的操作、视频信息等。为此,应着重采集:①各战位操作员操作的有关动作记录,表明什么时间、做了什么操作动作;②各传感器的探测信息,有较高逼真度需求的应采集传感器获取的信号级信息,以支持驱动相应孪生体工作;③电子设备的录屏信息、武器装置发射动作的传感器监控视频信息,以便于实验中对照比较孪生体处理结果与真实情况的差距。

3) 如何构建作战系统的孪生体。

作战系统涉及的装备多,包括传感器、指控、武器、导航、通信等设备以及人员,既涉及信息装备如多功能显控台、也涉及机械执行机构如发射控制装置,构建其孪生体与生产实际装备一样是一个复杂的系统级工程。工欲善其事,必先利其器。为支持作战系统孪生体的构建,首先需要的是开放的先进工具和统一的构建标准、集成标准,支持对系统各设备、分系统分工进行虚拟、数字设计,支持进行虚拟集成。

目前在孪生体构建上还比较缺乏综合、开放、集成性强、兼容性强的工具与平台,虽然已有商业工具和平台如 MATLAB 的 Simulink, ANSYS 的 TwinBuilder, 微软的 Azure, 达索的 3D Experience (空客公司用于设计和制造 A350XWB 飞机^[1]) 等^[9],但因软件生态的封闭性等原因,存在不同工具产品交互与集成难、协作难、兼容性差等问题,这些问题需要在系统孪生体构建的方案阶段统筹谋划,选择科学、合理的技术路线解决。

孪生体的运行环境可考虑基于大型的云计算中心,孪生体运行在云计算中心的后台服务器上,前端用户可以通过显示器、鼠标等人机交互设备进入虚拟世界对孪生体进行操控。云计算中的虚拟化技术,目前已经可以虚拟出计算机及其操作系统、数据传输设备有关功能、性能,为真实装备计算机软件在虚拟计算机上运行提供了技术支撑。

实装的计算机软件可以设法移植到云计算环境下,以提高构建有关孪生体的效率。对于非计算机的其它有关设备的虚拟化,比如雷达天线、声呐

湿端传感器、光电探测传感器、发射装置机械执行机构等,如何在虚拟化环境中实现仿真是急需解决的难点问题,需重点关注。对作战系统人员的虚拟化,主要是对其决策、操作行为的仿真,可考虑采用 Agent 技术将人员视为一个智能体,为人员赋予有关行为规则。

4) 关于孪生体的测试评估。

目前缺乏数字孪生评估与测试的商业化工具与平台,应结合作战系统特点予以定制。在虚拟环境下,对孪生体进行功能、性能测试评估,如果能够较逼真地模拟战场环境、敌方目标、武器等驱动信息,则可以在虚拟世界驱动作战系统孪生体运行,并完成有关虚拟测试评估技术。若评估出的系统功能、性能、系统运行行为特点与作战系统在实际情况下表现非常相像,将说明孪生体逼真度很高。

4 结束语

孪生体来源于物理世界,同时可以反作用于物理世界。潜艇作战系统应用新技术的目的主要是为了提高潜艇作战系统的作战能力,从孪生体概念内涵来看,其具有加快作战系统设计、开发过程的技术潜力,能够支持人们在虚拟世界中开展作战系统的改造活动,根据改造的效果决定是否将这样的改造活动应用到物理世界中提高实际系统能力;能够支持将作战系统的真实运行情况注入到孪生体中,使得开发人员能够在实验室等环境下了解产品的实际使用情况,为开发人员实现产品的有效改进、维修保障提供支持。

为适应战争需要,作战系统是一个需要具有高度

适应能力的系统,为提高系统适应变化的能力,实际应用中需要不断升级改进系统。数字孪生技术为在虚拟空间开放灵活地尝试对系统进行虚拟改进并验证提供了广阔的想象空间,为提高改进效率,还需要通过标准化、模块化、开发平台通用化等方式,使得改进虚拟的作战系统要素相比改进物理实体要素成本更低、更容易实现,以促进系统改进效率的提升。

参考文献

- [1] 郭嘉凯. 数字孪生:连接制造物理世界和数字虚拟世界的最佳纽带[J]. 软件和集成电路, 2018(9): 1.
- [2] 孙敏. “数字孪生”改变行业规则的顶尖技术[J]. 大飞机, 2018(6): 44-47.
- [3] 戴晟, 赵罡, 于勇, 等. 数字化产品定义发展趋势:从样机到孪生[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2018, 30(8): 1554-1562.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 赵敏. 探求数字孪生的根源与深入应用[J]. 软件和集成电路, 2018(9): 50-58.
- [7] 时培昕. 数字孪生的概念、发展形态和意义[J]. 软件和集成电路, 2018(9): 30-33.
- [8] 张仪, 杨国华, 李志伟, 等. 基于信息流的潜艇作战系统作战能力试验方法研究[J]. 舰船电子工程, 2017, 37(7): 25-28.
- [9] 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.

(责任编辑:张曼莉)