

doi: 10.7690/bgzdh.2023.05.020

基于数字工程的武器装备发展研究

闫仲秋, 陈义平, 邵奇, 程飞

(中国船舶集团公司第七一六研究所, 江苏 连云港 222061)

摘要: 针对军工行业发展面临管理方式复杂、数字化设计能力不足、能力与需求不匹配以及装备维护保障困难等问题, 从数字工程推进机制、数字化能力需求分析、数字工程建设标准等方面开展相关研究, 分析国外研究现状和武器装备发展面临的主要问题, 提出武器装备应用数字工程的推进建议。结果表明, 该研究对促进军工全行业的数字化转型发展具有指导意义。

关键词: 数字工程; 武器装备; 系统工程; 装备研制

中图分类号: TJ05 **文献标志码:** A

Research on Development of Weapon Equipment Based on Digital Engineering

Yan Zhongqiu, Chen Yiping, Shao Qi, Cheng Fei

(No. 716 Research Institute of China State Shipbuilding Corporation Limited, Lianyungang 222061, China)

Abstract: In view of the problems of complex management mode, insufficient digital design capability, mismatch between capability and requirement, and difficulty in equipment maintenance and support in the development of military industry, this paper carries out related research from the aspects of digital engineering promotion mechanism, digital capability requirement analysis, and digital engineering construction standards, and analyzes the main problems faced by foreign research status and weapon equipment development. Some suggestions are put forward to promote the application of digital engineering in weapon equipment. The results show that the research has guiding significance for promoting the digital transformation and development of the whole military industry.

Keywords: digital engineering; weapon equipment; systems engineering; equipment development

0 引言

武器装备是指面向军方作战使用并由国防军工行业进行研制生产的武器、弹药及其配套产品等, 大多是涉及到多学科、多领域且具有一定技术复杂度而需要进行研制的特殊产品。随着电子信息技术的发展, 现代战争已演变为体系对体系的对抗, 武器装备的作战使用环境正从近海向深远海, 从地面向高空、邻近空间、太空、网络、信息以及特殊空间不断拓展, 并在预警探测、情报侦查、指挥控制、火力打击、通信传输、战场保障等方面实现信息的自动化、网络化, 新型武器装备多功能和高性能指标导致装备复杂性大大增加。

复杂武器装备的研制过程大多包含多个专业方向、多家配套科研院所协同设计, 需分阶段经过设备级、二级系统、一级系统等多个级别的集成和验证, 是一项涉及多个系统/设备、多个学科领域、多个专业方向、多个协作单位、多层次集成的复杂系统工程, 从而导致大量武器装备在需求跟踪、能力验证、研制管理、生产制造、质量控制等方面面

临诸多挑战。

数字技术正被广泛融入到各行业的产品设计、研发以及服务与流程中, 数字化转型已成为顺应时代发展的必然趋势。展望国防技术发展的趋势, 以数字化为核心的新一轮信息技术革命, 必将是改变传统装备研制、制造和应用, 重塑武器装备建设体系, 推动武器装备高质量发展的的重要途径^[1]。

1 国外研究现状

美军将数字工程视为“改变游戏规则”的颠覆性机遇, 自 20 世纪 90 年代, 美军在装备采办各阶段广泛应用建模仿真技术, 由装备设计向使用保障延伸。进入 21 世纪后, 美军在装备采办中全面实行基于模型的系统工程, 推进装备全寿命周期管理; 同时, 持续开展计算研究与工程采办工具和环境 (CREATA)、工程强韧系统 (ERS) 等系统建设, 推动基于统一模型数据驱动的采办决策^[2], 而后又运用数字系统模型、数字线索、数字孪生等信息技术, 旨在缩短装备研制周期, 大幅提升装备质量。

收稿日期: 2023-01-29; 修回日期: 2023-2-26

基金项目: 江苏省科技基础设施建设计划-院士工作站 (BM2019126)

作者简介: 闫仲秋 (1994—), 男, 江苏人, 硕士, 工程师, 从事作战指挥、装备建设、无人体系、数字工程研究。E-mail: yanzqbupt@163.com。

从2014年起,美国国防部组织洛克希德·马丁、波音、诺斯罗普·格鲁门、通用电气等公司开展了一系列应用研究项目,并于2018年正式宣布了基于数字孪生体的数字工程,旨在将以往线性的、以文档为中心的装备建设模式转变为动态的、以数字模型为中心的“数字工程生态系统”,使美国军队完成以模型为中心的模式转型^[3]。在宙斯盾舰艇上,美军“虚拟宙斯盾”系统虚拟了部分宙斯盾系统的核心硬件,包含了宙斯盾作战系统基线9的全部代码,可实行全部的作战系统功能,并可随舰部署,参与演习。在不影响实际作战系统情况下,从本舰获取作战真实数据,对系统软件进行现场测试和评估,并实时在线更新到舰艇上,大幅缩短了宙斯盾系统新能力的升级和部署周期,降低了系统整体成本^[4]。F-35战斗机利用数字孪生体构建了全尺寸的数字复制品,这个数字复制品能够帮助美军在研发和制造阶段或部署之后问题出现之前,就可以实现预测性分析,以确定和理解性能、可靠性和维护需求^[5]。2021年,美国国防部把F-35的数字孪生体应用作为典型,上报给国会,建议全面推广数字孪生体技术。

2 武器装备发展面临的主要问题

2.1 全寿命管理能力弱

复杂武器装备涉及的专业领域较多,工程系统庞大,且各供应链单位间配套协作关系及工作界面复杂,合同管理、择优管理、计划管理、技术状态管理、经费管理、综合特性管理、过程管理仍普遍采用文本和经验的管理方式,项目管理活动中各种沟通、协同、决策活动通过静态和不连续的文档完成并需要解释,全寿命周期的管理活动数字化严重不足,由此导致的设计质量不交底、供方管理不到位、质量风险不拖底、责任落实不见底等问题突出。

2.2 数字化设计能力不足

当前武器装备研制过程中缺乏科学工具和方法、自底向上堆叠、难以对设计成果进行有效验证等问题突出,缺乏系统层面的架构模型、功能模型、性能模型、行为模型、接口模型以及统一的建模规范和标准。虽然各专业各院所内部都有自己的模型设计体系,数字化有了初步发展,但不同院所不同专业模型的信息接口、存储方式、交互方式不同,往往难以进行有效集成,在设计阶段无法有效开展跨专业的联合仿真设计与验证,存在过设计和欠设

计的风险。

2.3 能力与需求不匹配

一方面,在装备论证过程和研制过程中,装备使命任务、作战能力、功能性能、系统组成之间采用经验分析的方式,缺乏通用的交互结构与描述方式,对方案变更影响分析和变更追溯困难。另一方面,复杂武器装备的研制周期普遍较长,而随着军事理论和需求的快速变革,以及新技术的快速发展,新的作战概念、新的装备形态层出不穷,装备在研制过程中状态变更困难导致新技术难以开展有效的集成应用,交付部队的装备作战能力与新形势下军事需求存在不匹配的可能性很大。

2.4 装备维护保障困难

目前武器装备维护方式主要分为恢复性维护和预防性维护2种方式,已很难满足装备可靠使用的要求,对装备的健康状态缺少实时感知和预测能力,外场装备质量问题出现的风险无法进一步下降,且复杂武器装备带来的技术质量问题责任不清晰、处理维修条件要求高、供应链保障能力不足、局部对整体的影响评估困难等问题突出,导致了外场装备质量问题处理难度进一步增大。

3 武器装备应用数字工程的具体构想

武器装备数字工程是一系列应用于武器装备全寿命周期数字化工具、技术、方法以及理念的集合,在应用过程中必然采取阶段式跃升、递增式发展的思路,从局部走向整体、从研制走向管理、保障等全寿命周期。在数字工程应用的初期主要采用基于模型的系统工程方法(model based system engineering, MBSE),以加强研制过程的数字化水平,并逐步走向武器装备的数字孪生时代。MBSE是一种系统工程方法,专注于创建和利用领域模型,作为工程师之间信息交换的主要手段,而不是基于文档的信息交换。MBSE能够替代传统系统以文件为中心的方法,并且通过完全集成至系统工程流程的定义中来改变将来系统工程的实践。MBSE是规范化的应用建模技术,来支持系统需求、设计、分析、验证与确认,从概念设计阶段直至生命周期的后期各个阶段,持续贯穿整个产品的开发^[6]。

当前,在军工行业亟需推进采用基于模型的系统工程设计方法,将装备系统模型作为各学科模型的“集线器”,各专业人员围绕装备的系统模型开展需求分析、系统设计、仿真等工作,便于整个装备

系统团队跨专业跨院所协同工作,更好地利用各专业各院所在模型、软件工具上的先进成果^[7]。通过基于模型的系统工程设计方法,可积累大量的装备数字模型,支撑建立覆盖装备论证、装备研制、作战使用以及装备保障全流程的数字孪生体,提升装备全寿命周期的数字化。

3.1 装备论证过程中的应用构想

首先通过 MBSE 需求分析方法,梳理使用部队、主管机关以及军工科研部门等利益相关方需求,确保形成对需求的一致性准确理解。再从体系视角下的作战概念出发,厘清标准化的装备作战需求、基本型谱、要素关系、规模比例,通过架构设计进行需求指标的规范化、显性化分解,最终建立装备作战需求与装备研制流程的对接,实现需求的可覆盖性和可追溯性。

3.2 装备研制过程中的应用构想

通过 MBSE 设计方法,构建一套共享开放的全数字化设计环境,从基于模型的多专业联合仿真验证再到实物验证,保证设计的各个阶段不断进行联合仿真评估,避免过设计和欠设计,多专业多领域模型可复用,时间代价大大缩减,加强了跨系统、跨专业的方案变更影响分析能力与变更追随能力,方案修改、完善、优化的经济成本接近为零,各参研单位、主管机关、使用用户可参与装备研制全过程,清晰地掌握系统状态^[8]。

3.3 装备生产过程中的应用构想

在生产环节,设计部门向生产部门交付数字样机,形成基于多物理量的复杂工艺建模仿真能力和基于生产数据的实时分析能力,并贯穿设计部门与生产部门,建立全面数字化的生产流程和赛博物理生产系统基础条件,构建生产线的数字孪生模型,能够实现制造活动基于模型、数据驱动的优化、运行和控制,大幅提升质量水平和管理驱动的优化、运行和控制,提升装备生产效率和水平。

3.4 作战使用过程中的应用构想

装备研制过程中的数据模型可支撑构建细粒度的装备作战仿真模型,此时装备作战仿真模型是自上而下顶层设计后装备行为特征的主动展示,而不是对装备行为特征的简单描述,可辅助科研技术人员和作战指挥人员进行高精度的作战仿真评估工具开发与应用,有效提升军事对抗仿真的准确性。

3.5 装备保障过程中的应用构想

在实验室构建系统级的多物理多应力下仿真模型,在装备全寿命周期通过传感器不断地进行数据交互,使其具备与真实装备相同的动态行为特征和故障关联关系,最终形成能够对物理装备精准描述的全数字化装备孪生体。科研人员与使用用户可根据实验室内数字孪生体指导真实装备实现远程现场维修,并根据收集的真实装备目标信号进行真实装备的实时高精度健康预测^[9]。

3.6 装备管理过程中的应用构想

通过对竞争择优、合同订立、过程监管、检验评估、使用管理、维护保障、技术状态管理等活动的数字化,实现管理过程由基于文档流转向基于模型驱动转变,决策判断由依靠经验定性分析向基于数据定量分析转变,风险管控由事后应对向事先预测规避转变,提升装备全寿命周期的精细化管控水平。

4 武器装备应用数字工程的推进建议

4.1 开展武器装备应用数字工程顶层策划

武器装备数字工程是一种贯穿于装备全生命周期研制理念的转换和改变,是科研生产模式由传统的基于静态文档的研制模式向基于动态模型的研制协同模式和产品质量保证模式转变,需要建立与之匹配的体系来管理和组织^[10]。因此,武器装备数字工程必须面向装备建设运用全生命周期,按照 3 个阶段(装备论证、装备建设、装备运用)、2 条主线(装备实体建设、数字系统动态演进)、1 个贯穿(全过程评估及迭代循环)进行全面布局,体系化推进流程、方法和工具体系建设,抽象出普适性装备数字化基本架构和工程推进机制,制订切实可行的实施路线,科学指导装备数字化发展。武器装备数字工程全寿命周期应用流程如图 1 所示。

4.2 开展武器装备数字化能力需求分析

装备数字工程需将装备数字化能力需求作为顶层输入,基于统一装备数据,遵循统一装备标准规范协议,按照作战域和装备域“两域”,数据和标准“两纵”,如图 2 所示区分作战运用层、作战能力层、装备功能层、实体装备层“4 层”,采用结构化、定性与定量相结合的层次之间的表单描述方式和通用交互结构,构建“任务-能力-功能-装备性能”的装

备能力分配架构，实现实体装备建设与不同使命任

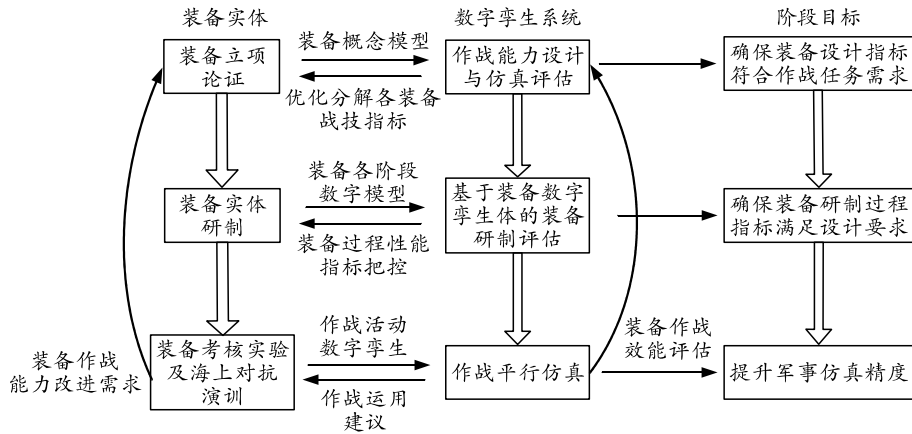


图 1 武器装备数字工程全寿命周期应用流程

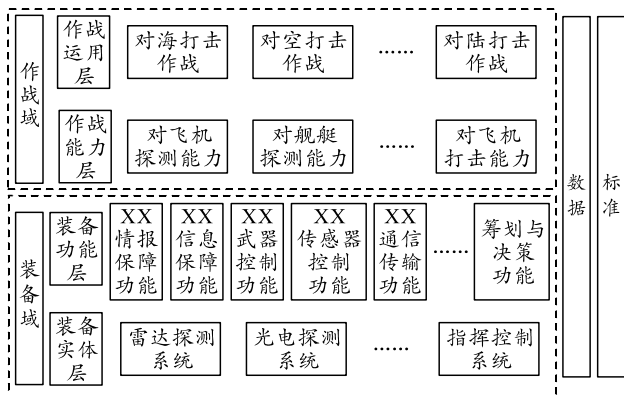


图 2 武器装备数字化能力需求分析架构

作战运用层：描述完成特定作战任务而构建的装备力量编组、作战运用和信息交互关系，用于科学分析装备的典型作战活动，将作战样式具体化和实例化，以特定的作战背景为基础来分析实现作战概念目标的作战任务及其要求，最终形成作战任务清单^[11]。

作战能力层：作战能力层是在作战运用层指导下形成的作战功能需求体系，以作战概念为牵引，识别提出作战能力的种类和总体构想，通过构建作战活动与作战能力关联矩阵，优化作战能力指标体系并确定指标要求，最终形成作战能力清单。

装备功能层：表征了装备体系实现作战能力需求的功能组成和指标要求，依据作战能力需求清单逐项确定装备功能要求，建立作战能力与装备功能的映射关系，由作战能力需求确定装备功能的组织结构和指标要求。

装备实体层：反映了装备的种类、数量和形态等特征，根据装备体系功能需求与装备种类之间的映射关系确定装备的种类和形态特征，建立装备功能、数量与装备体系功能指标要求之间的分析模型，

计算各项作战功能的装备数量需求^[12]。

4.3 开展武器装备应用数字工程建设标准研究

针对武器装备的研制过程，开展武器装备数字工具体系建设，明确武器装备应用数字工程的开发和集成规范，通过统一的基础框架实现数字化协同设计平台、知识库、工具库等信息系统的集成，支撑各类装备在信息空间构建物理实体的数字镜像。一是明确统一概念模型、装备研制阶段数字模型以及作战活动数字模型的接口和开发规范，构建统一的作战要素模型库、作战知识库、战法规则库以及作战数据资源目录，形成各类作战资源要素数字化的统一语言；二是建立传感器数据的采集、传输、处理、存储方法，构建物理空间与虚拟空间的桥梁，实现数字孪生体对物理设备数据进行准确地感知获取；三是建立基于机器学习、深度学习等复杂算法将数据转换成模型的替代方法，将高精度数据与系统机理有效结合起来，获得更好的状态评估和系统表征结果；四是构建物理融合、模型融合、数据融合和服务融合 4 个维度的交互与协同框架模型，覆盖人、机、环境多种要素，实现物理-物理、虚拟-虚拟、物理-虚拟的交互协同应用。推动数据跨域共享融合，促进数据创新应用增值，支撑建设形成可动态演进的武器装备数字孪生系统，具备面向武器装备全行业全寿命周期的模型集成和效能评估能力。

4.4 开展武器装备全寿期数字云平台建设

基于云计算基础架构，建设链接各军工集团总体设计、分系统设计、生产、试验等单位的分布式装备数字化云平台，构建覆盖装备全寿命周期的数据中心，实现装备研制和管理业务系统的安全高效

运行、快速敏捷开发,加速业务持续创新,开展 5G、大数据、人工智能、工业互联网、虚拟现实等技术在装备研制过程中的应用。持续推进研发设计平台、资源一体化平台、智能制造平台、综合管理平台建

设,使每一个业务流程都实现必要的数字化管理,充分感知装备研制过程中的运行状态,通过分析、预测以及算法模型,辅助装备研制过程中科学决策,实现装备研制流程的自动化、智能化、智慧化。

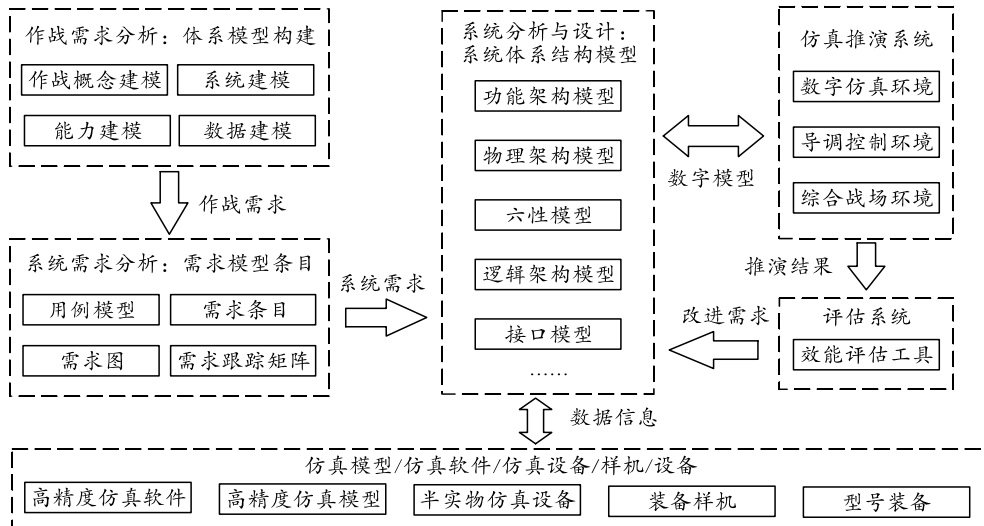


图 3 武器装备数字工程建设标准架构

5 结束语

武器装备建设是一项复杂的系统工程,推进基于模型的系统工程设计方法,可在虚拟世界通过建模与仿真进行不同学科性能的验证、设计迭代和综合优化,从系统、设备、整机、模块、元器件各个层级的科研生产过程为主线逐层展开并拓展至各相关管理领域,最终迈入武器装备的数字孪生时代,用数字工程驱动武器装备全行业全寿命周期的发展,以最小的经济成本和时间代价确保最终交付的复杂系统更好地满足部队的复杂要求,促进军工全行业的数字化转型。

参考文献:

[1] 石振华,戴永长.以数字线索理念为指导的系统生命周期管理技术研究[J].智能制造,2019,4(8):35-36.
 [2] 刘亚威.管窥美军数字工程战略——迎接数字时代的转型[J].科技中国,2018(3):30-33.
 [3] 崔艳林,王巍巍,王乐.美国数字工程战略实施途径[J].航空动力,2021(4):84-86.
 [4] 美国进行首次陆基“宙斯盾”系统实弹拦截测试[J].电

子产品可靠性与环境试验,2016,34(1):62.
 [5] YANG W Q, ZHENG Y, LI S Y. Application status and prospect of digital twin for on-orbit spacecraft[J]. IEEE Access, 2021, 9: 106489-106500.
 [6] 毛寅轩,赵滢,蒲洪波,等.模型化——新时代提高我国系统工程能力的必由之路[J].国防科技工业,2021(3):56-59.
 [7] 焦洪臣,雷勇,张宏宇,等.基于MBSE的航天器系统建模分析与设计研制方法探索[J].系统工程与电子技术,2021(9):2516-2525.
 [8] 张兵,陈建伟,杨亮,等.基于模型的系统工程在航天产品研发中的研究与实践[J].宇航总体技术,2021,5(1):1-7.
 [9] 赵峰,陈伟政,韦喜忠,等.系统工程在船舶总体性能研发中的实践思考[J].中国造船,2021,62(2):275-283.
 [10] 郝旭东,苑建伟,刘道伟.电子信息装备试验大数据系统建设[J].指挥控制与仿真,2020,42(1):6-9.
 [11] 叶振信,宁雷,李芳.系统工程实践下对装备体系工程建设的思考[J].中国航天,2021(5):57-61.
 [12] 马宝林,刘德胜.作战体系评估指标体系结构构建方法[J].指挥控制与仿真,2021,43(2):50-56.