

# 航天装备数字化建设研究与实践

赵民, 贾长伟, 张冶

(中国运载火箭技术研究院, 北京 100076)

**摘要:** 数字化工程为航天装备研制模式变革提供了全新机遇, 也对装备数字化建设的推进落地提出了巨大挑战。给出了航天装备数字化建设的定义与内涵, 系统分析了我国航天装备数字化建设推进中的难点问题, 围绕装备数字化建设的方案规划、能力建设、应用实践及持续改进这一复杂系统工程过程, 提出装备数字化建设生态治理建议, 保障装备数字化建设。

**关键词:** 航天装备数字化建设; 航天装备; 系统工程; 基于模型的系统工程

中图分类号: V419

文献标志码: A

文章编号: 2096-4080 (2023) 02-0027-08

## Research and Practice of Space Equipment Digital Construction

ZHAO Min, JIA Changwei, ZHANG Ye

(China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China)

**Abstract:** Digital engineering provides a new opportunity for the change of space equipment development mode, and also presents a great challenge for the promotion of digital construction of equipment. This paper gives the definition and connotation of space equipment digital construction, systematically analyses the difficult issues in the promotion of space equipment digital construction in China, and puts forward suggestions for the ecological governance of equipment digital construction around the huge complex system engineering process of program planning, capacity building, application practice and continuous improvement of equipment digital construction to guarantee the digital construction of equipment.

**Key words:** Space equipment digital construction; Space equipment; System engineering; Model based system engineering

### 0 引言

当前, 新一轮科技革命、产业革命、军事革命快速发展, 基于模型的系统工程、数字孪生、数字主线等新型技术不断涌现, 推动复杂装备研制从信息化时代步入到数字化时代。国外方面, 波音、洛马、美空军、美海军等广泛采用基于模型的系统工程思想开展复杂装备的研制应用, 诸多突破性成果推动美军在 2018 年正式启动了数字化工程战略<sup>[1]</sup>。该战略的核心是将国防工业体系从以文档为中心的线性采办向以数字模型为中心的

技术和管理的核心。

我国在《“十四五”数字经济发展规划》中提出, 要深入实施智能制造工程, 大力推动装备数字化<sup>[2]</sup>。数字技术为航天装备研制模式变革提供了全新机遇, 也对装备数字化建设的推进落地提出了巨大挑战。本文系统分析了我国航天装备数字化建设推进中的难点问题, 提出航天装备数字化建设框架、建模语言及模型全生命周期演进框架, 论述自主可控的数字化系统工程平台及应用, 提出装备数字化建设生态认知域、产品域、应用域、合作域治理建议, 保障装备数字化建设。

收稿日期: 2022-11-12; 修订日期: 2023-02-17

基金项目: 国家部委基础研究项目 (202105ZJ0001)

作者简介: 赵民 (1965-), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为飞行器总体设计。E-mail: yhzts@163.com

## 1 航天装备数字化建设内涵

航天装备领域开展数字化转型,需要厘清航天装备数字化建设内涵,统一共识,为发展数字航天奠定基础。赛迪智库将装备数字化定义为“利用智能传感、互联网、大数据、数字孪生、人工智能和区块链等技术,提升装备性能、效能,以及智能化水平的演进过程,旨在形成具备状态感知、集成互联、决策优化和自主作业等能力的智能装备”<sup>[2]</sup>。美国国防部将数字化工程定义为“一种集成的数字方法,使用系统的权威模型和数据源,以在全生命周期内跨学科、跨领域地连续传递模型和数据,支撑系统从概念开发到报废处

置的所有活动,其将融入超级计算、大数据分析、人工智能、机器学习等创新技术以提升工程能力,并最终建立一个完整的数字工程生态系统”<sup>[3]</sup>。可以看出我国装备数字化和美军数字化工程的目标、手段基本趋同,都是利用数字化技术对工程、产品和服务的优化过程。

结合航天装备领域特点,针对航天装备数字化建设给出如下定义:

航天装备数字化建设是将新型数字技术与航天装备技术深度融合,实现航天装备研制模式变革(新方法)、产品智能升级(新能力)和价值体系重塑(新价值)的演进过程,如图1所示。

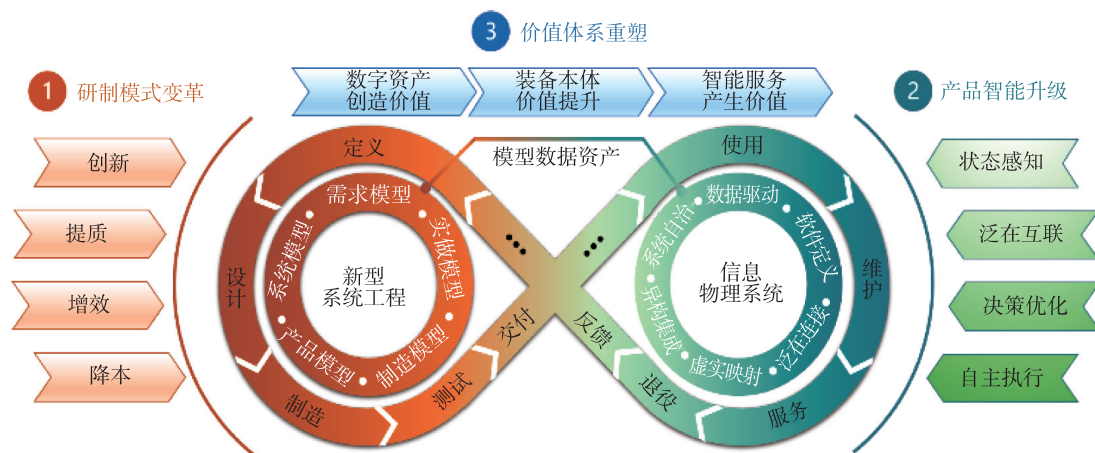


图1 新型数字技术与航天装备技术深度融合

Fig. 1 Deep integration of new digital technology and space equipment technology

### 1.1 基于新型系统工程的研制模式变革

模型与数据驱动的新型系统工程是系统工程的最新发展,其核心是通过数字系统模型支撑装备产品数字化与研制过程数字化,实现产品数字化交付、产品全系统虚拟仿真试验<sup>[4-6]</sup>、研制全流程数字化模型贯通,通过在数字空间开展低成本、高效率的“产品设计-虚拟试验”多轮迭代<sup>[7]</sup>,从而高质高效地支撑装备全流程数字化研制,实现创新、提质、增效、降本。

### 1.2 面向信息物理系统的产品智能升级

信息物理系统是在环境感知的基础上,深度融合计算、通信和控制能力的可控可信可扩展的网络化物理设备系统<sup>[8]</sup>。现代航天装备越来越呈现信息物理融合特征,通过产品的智能升级,具有状态感知、实时分析、科学决策、最优控制等

计算,通信,自治和协作功能<sup>[8-10]</sup>。航天装备数字化建设将人工智能、大数据、数字孪生和智能传感等数字技术与航天装备深度融合,构建信息物理系统<sup>[11]</sup>,进而提升航天装备的功能、性能和效能,形成智慧火箭、智慧卫星等智能航天装备。

### 1.3 围绕模型数据资产的价值体系重塑

在研制模式变革和产品智能升级的基础上,将重塑装备的价值体系。航天装备功能性能效能提升,使得装备本体价值提升;产品智能升级后,可通过智能服务产生价值。更重要的是,航天装备从定义、设计、制造到维护运用的全生命周期中积累的模型和数据将形成新的生产资料——数字资产,成为装备继产品制造之外的另一个全新的价值创造点,进而将逐步构建出完备的装备数字资产新价值体系。

## 2 推进航天装备数字化建设的难点问题研判

数字化建设的推进本身也是非常复杂的系统工程,美国国防部提出通过构建数字化工程生态,支撑数字化工程战略。数字化建设生态包含技术流程和技术管理流程,围绕规范模型的开发、集成与使用,持久性地提供权威事实源,将技术创新融入工程实践的改进,构建数字工程的支撑架构和环境,完成文化与团队的数字转型这 5 大目标<sup>[12]</sup>开展建设。

近年来,我国航天、航空、核能、船舶、汽车等行业广泛开展数字化建设方法探索和应用,在空间站、运载火箭、民用大飞机等重大型号中积累了数字化建设应用经验<sup>[13-15]</sup>。但从数字化建设生态视角考察,数字化建设推进的完整性、系统性不强,尚未实现装备数字化高质量发展。

解决航天领域当前及未来数字化建设实施过程中的工程实际问题,是构建航天数字化建设生态体系的直接需求和核心目的。本文从流程方法、标准规范、协同技术、工具平台、工程应用等方面入手,通过充分调研,总结出推进航天装备数字化建设的难点问题如下:

1) 流程方法层面,尚处于跟踪国外通用数字化工程方法的探索应用阶段,缺少结合航天任务特点的数字化研制流程。

国内外在 MBSE 领域已经建立了多个框架及方法,比较代表性的包括 DODAF、UPDM、UAF、HarmonySE、MagicGrid、ARCADIA 等<sup>[16]</sup>。当前主流的方法和框架都是通用性的,没有针对某一个特定的行业或者学科,以至于和特定行业业务之间存在鸿沟。例如 MBSE 在国内航天领域落地时,时常面临不知如何开展、如何落地的情形,航天设计师不了解已有的通用 MBSE 建模语言,并且由于其高度抽象性难以在短时间内理解和接受;再者,已有的数字化建模工具只提供一个最底层的建模框架,离达到航天设计师便利使用还有较大差距。

2) 标准规范层面,缺少与国内航天系统工程实际研制模式紧密结合,具有可操作性的标准、规范与指南作为支撑。

NASA 在现有系统工程标准体系基础上,构建了较为全面的基于 MBSE 的航天器设计标准体

系。ESA 在 MBSE 标准和全生命周期应用方面持续开展系统性工作,致力于装备全生命周期数据一致性和基于模型的持续性验证,不断更新航天工程标准体系<sup>[17]</sup>。国内主要航天院所已开展研究 SysML、Modelica、FMI 等标准规范在航天 MBSE 中的定位及作用,初步规划航天 MBSE 标准规范体系,并逐步形成所标、院标,但标准体系还不完善、研制周期中关键活动覆盖度还不够。

3) 协同技术层面,尚未实现跨领域统一、跨层次集成、跨阶段持续、跨地域协同的仿真验证。

针对系统工程到各领域工程的衔接过渡,国外已实现了基于领域架构模型的自顶向下设计与各专业领域模型的自底向上的集成验证。以系统模型中物理架构的各领域相关部分作为各领域的基础架构,进一步定义各领域架构<sup>[18]</sup>,如机械领域架构、电气领域架构或软件领域架构,这些领域架构比系统层级的物理架构更加详细,用于下一阶段的各领域模型之间的集成。国内部分航天单位结合业务领域,在跨领域统一、跨层次集成的仿真验证方面有局部的探索与实践,但在跨阶段持续、跨地域协同方面尚处于研究阶段。

4) 工具平台层面,尚处于国外工具软件的独立应用阶段,未形成一体化集成平台。

ESA、NASA 等机构开发了航天器系统设计仿真平台,在航天器构思、设计、建设和测试、发射支持等全生命周期中得到了典型示范应用,有效牵引复杂空间任务实现跨越式发展。例如 NASA 开发的 OpenMBEE 和 ESA 开发的 VSEE,就是典型的基于模型的航天器系统设计与验证平台。国内航天单位的通用工具以使用国外工具软件为主,局部有对软件接口进行二次开发或结合特定专业开发领域专用软件,尚未形成整体解决方案。

5) 工程应用层面,国内尚处于分系统或系统的局部试点阶段,缺少立足实际航天工程型号的体系化应用。

NASA 和 ESA 等机构已开发了基于模型的系统工程基础架构,构建了主题的基础元素和可重复建模模式,在多个项目和研发环节中均得到了典型应用。国内运载器、探测器单位均开展了 MBSE 试点应用,在需求建模、功能逻辑、物理建模、多领域仿真验证技术的掌握和模型库建设等方面取得了一定成果,应用的深度和广度方面

距离理想的 MBSE 模式还存在距离。

### 3 航天装备数字化建设探索与实践

在广泛调研国内外装备数字化建设技术研究与工程应用的基础上，针对前述装备数字化建设推进问题和难点，结合航天装备领域已有技术基础，系

统性地开展了航天装备数字化建设探索与实践。

#### 3.1 航天装备数字化建设框架

从标准规范、模型体系、工具平台和工程应用 4 方面着手，提出了航天装备数字化建设总体框架，如图 2 所示。

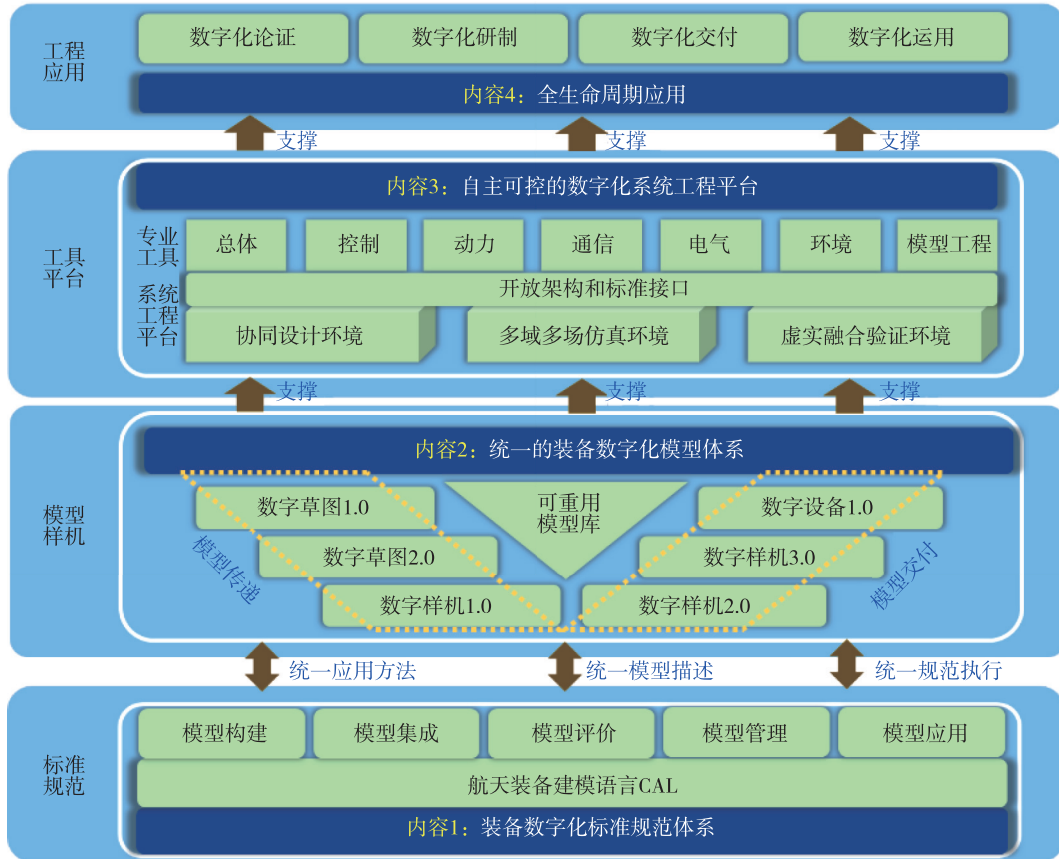


图 2 航天装备数字化

Fig. 2 Space equipment digitization

标准规范层，研究航天装备建模语言 CAL，从源头解决多源模型构建与集成复杂性问题；围绕航天装备数字化系统模型的构建、集成、评价、管理和应用等关键环节，形成适用于中国航天任务体系的过程数字化统一标准规范，确保数字系统模型与真实系统保持一致且同步演进，规范模型与数据融合驱动的航天数字工程过程。

模型体系层，梳理航天型号主要流程活动的模型化需求，对模型使用场景、内容预期、拟解决的问题作研究以及规划，建立适用于装备全周期、全要素的模型样机演进框架；构建覆盖形成航天装备主要谱系、主要阶段、关键要素的可重用模型组件库。

工具平台层，打造自主可控、满足新型系统

工程范式的数字化设计与验证平台，具备可扩展、可组构、可伸缩的开放式软件架构；面向航天装备全生命周期打造总体、控制、动力、电气、环境等应用工具集。

工程应用层，通过在总体、分系统等开展全体系、全流程数字化应用，对标准规范、模型体系、自主平台的科学性、适应性和可操作性进行充分验证，使得项目研究成果能推广应用至其他航天装备领域。

#### 3.2 航天装备数字化建模语言

当前总体、动力、控制、电气等不同专业领域模型缺乏统一标准，存在大量语言体系不一、建模工具各异的遗留模型，缺乏统一语言体系造

成模型的“建-集-评-管-用”在源头上的复杂性。

综合利用和发展国际上已形成的 SysML、Modelica<sup>[19]</sup>、FMI 等数字化工程领域标准规范，提出基于一致化表达的航天装备数字化建模语言 CAL，从根本上解决跨学科模型集成及跨阶段信息传递问题。整合航天叙词语义网 CNet、航天系统对象建模语言 ASML、多领域建模语言 Modelica 等，制定航天装备基础语义架构规范，该语言实现架构包括上层的

模型文本、中层的编译器以及底层的仿真求解器共 3 部分。上层模型文本主要是根据 CAL 语言语法规义规范开发的模型，以 Modelica 和 Julia/Python<sup>[20-21]</sup>作为底层语言。中层编译器分为两部分，即针对 Modelica 语言的编译器，以及调用 Julia/Python 的解释器，两者之间有数据通信。底层仿真求解器基于 C/C++ 代码，对模型代码进行仿真求解。该建模语言框架如图 3 所示。

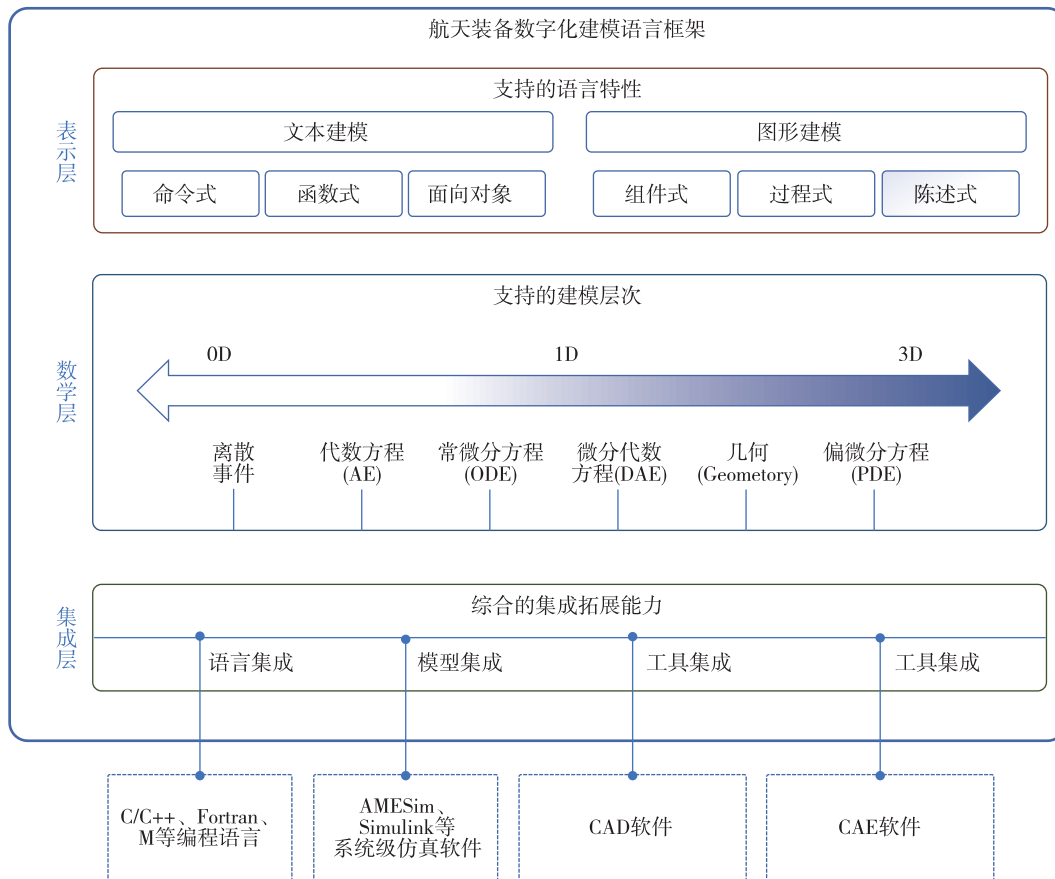


图 3 航天装备数字化建模语言框架

Fig. 3 Framework of digital modeling language for space equipment

CAL 支持文本建模与图形建模，文本建模方面提供现代科学工程计算语言的优秀特性，图形建模方面提供面向信息物理融合系统的统一建模能力；支持从 0D、1D 到 3D 的全级次建模；支持 C/C++、Fortran、Matlab 语言开发的模型或算法的集成，AMESim、Simulink 等系统级仿真软件的集成，以及 CAD、CAE 软件的集成。

航天装备建模语言可满足多场景的建模仿真需求，解决模型的可重用性和可重构性差、多类模型融合困难的问题，适应面向型号数字化转型的需求，为数字化建模仿真技术在型号中的深化

应用奠定基础。

### 3.3 模型全生命周期演进框架

提出一套样机系统模型演进框架，按照创意、论证、研制、试验、运用的逻辑顺序，将装备系统模型划分为 6 个状态，分别是数字草图 1.0、数字草图 2.0、数字样机 1.0、数字样机 2.0、数字样机 3.0 和数字装备 1.0，为各个状态的装备样机系统模型传递、数字化交付提供统一的建模语言、方法、工具体系，有效支撑可重用、统一的装备数字化模型体系。

### 3.4 自主可控的数字化系统工程平台

在标准规范和关键技术研究的基础上，充分

发挥国内工业软件技术力量，建设航天装备数字化系统工程基础平台与工具应用体系，见图 4。

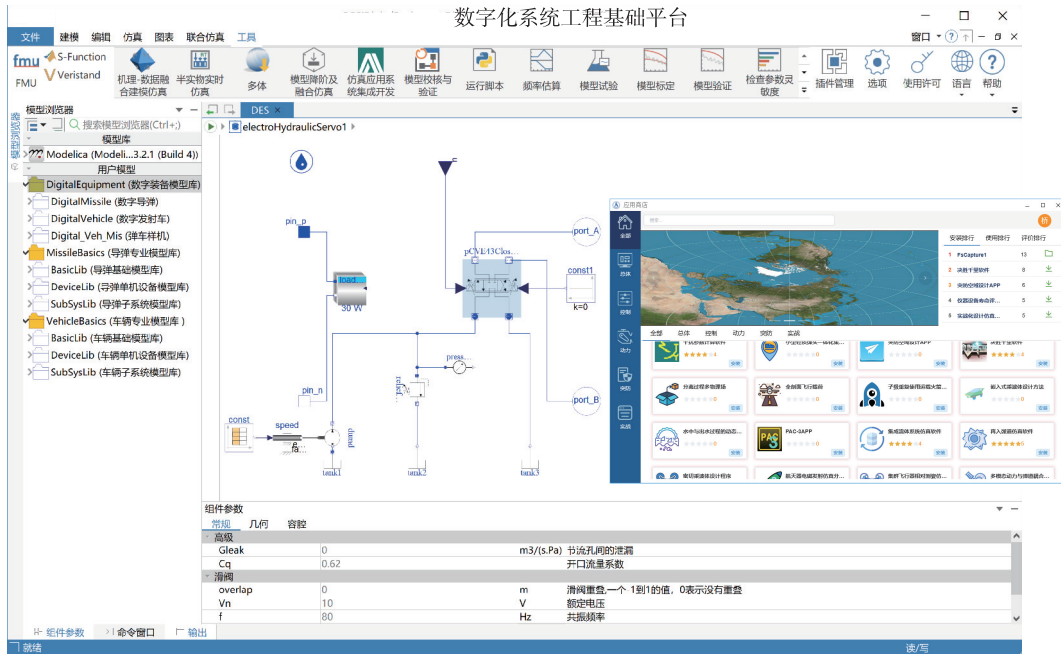


图 4 数字化系统工程基础平台

Fig. 4 Basic platform of digital system engineering

数字化系统工程基础平台由跨域协同设计环境、多域多场仿真环境和虚实融合验证环境 3 部分组成。跨域协同设计环境综合运用动态流程、跨域协同、即时通信等技术手段，形成便捷高效的协同设计环境；研发流程通过分发基于数据和模型的技术要求，形成高度集同的无缝协作机制。多域多场仿真环境遵循航天装备领域建模语言 (CAL) 规范，基于统一仿真引擎构建多粒度可重用模型组件库，支撑装备全系统性能样机的装配构造与快速验证；运用大数据修正、模型降阶等技术，全面提升模型预示精度。虚实融合验证环境基于开放式架构、标准化集成协议的 LVC 模型集成机制，形成全要素虚实融合装备，通过虚实融合验证方式覆盖产品、使用、环境等多种极限状态，验证核心指标。

在基础平台之上，通过工程 APP 实现设计方

法、设计规程的软件化，推动共享、重用与迭代升级。面向航天装备全生命周期的设计、验证、优化、监测、控制、维护等环节，构建一批总体、控制、动力、电气、环境等应用工具集。

### 3.5 航天装备数字化建设全生命周期实践

以某创新任务为对象，通过在总体、控制、动力等全层次、全链条、全流程体系性推进装备数字化应用。按照专业基础模型库、设备单机模型库、分系统样机模型库的多层级模型体系，基于物理定律、功能原理等知识，构建车辆的机械、液压、电气、控制、调温的层次化模型库，统一机械、电气、控制、软件等专业模型接口规范，确定主要设备、分系统模型接口形态，形成一套基于统一规范的可集成、可复用、可扩展、多层次、多场景的精细数理模型体系，实现智力资产的数字化积累与传承，车辆性能样机模型见图 5。

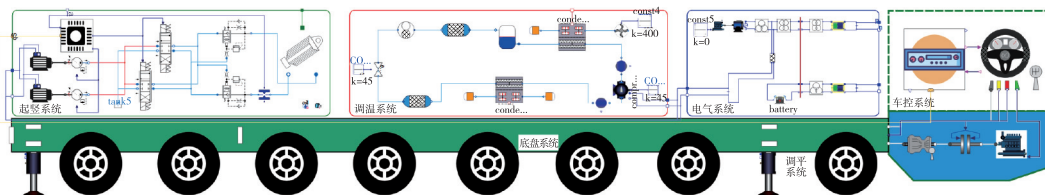


图 5 车辆性能样机模型

Fig. 5 Vehicle performance prototype model

### 3.5.1 数字化论证环节的实践

基于精细数理模型体系, 装配式构建车辆性能样机柔性架构, 以模型组件装配式替换、接口自动匹配方式, 快速扩展生成型号性能样机, 如将车辆的机械起竖改为电动起竖等。据此, 开展面向设计空间的海量方案生成、设计, 评估不同构型、组成对复杂装备性能的影响, 高效进行多方案比选和方案迭代, 实现总体方案全局最优, 对簇式迭代装备研制模式的推广应用奠定坚实基础。

### 3.5.2 系统级的数字化研制实践

基于性能样机模型, 可实现机、电、液、控、热等专业的统一建模与仿真联动, 完整地反映系统不同层次、不同设备的多学科特性, 同时可反映单机多学科特性与整体多学科特性, 可实现总体小回路、总体大回路、分系统小回路设计验证闭环等。

### 3.5.3 整车级的数字化研制实践

在数字车辆方面, 基于底盘分系统仿真模型, 开展多种地面工况下的展车机动过程仿真, 分析展车轮地动力学和爬坡、越障、制动、转弯等关键性能指标, 验证机动分系统设计与控制策略合理性; 基于调平分系统仿真模型, 开展多种地面工况下的展车调平过程仿真, 分析调平耗时、支腿支撑力、展车质心偏移等关键指标, 验证调平分系统设计与控制策略合理性; 基于起竖分系统仿真模型, 开展多种地面工况下的展车起竖过程仿真, 分析起竖耗时、起竖支撑力、起竖质心过载等关键指标, 验证起竖控制策略合理性; 基于弹射分系统仿真模型, 开展多种起竖角度下的展车发射过程仿真, 分析发射耗时、发射药柱推力、适配器和滑块地面落点分布等关键指标, 验证发射装置设计合理性; 基于数字车辆系统性能样机, 对机动、调平、起竖、弹射等全流程仿真, 验证发射准备时间、机动回转半径、系统控制流程等主要指标。

### 3.5.4 数字化鉴定实践

制定模型置信度等级标准, 推动模型置信度从理论级、估算级, 向精细级、校验级、孪生级迭代发展; 开展面向验证空间的“虚实混合”摸边探底试验、地面综合集成验证, 验证核心指标。航天装备数字化建设应用取得初步成效, 增强型号总体数字化能力, 加快装备数字化模式的发展速度。

## 4 推进航天装备数字化建设生态治理的建议

当前阶段, 发展航天装备数字化建设生态体系可从以下 4 方面着手。

### 4.1 数字化建设生态认知域治理

聚焦关键问题, 推动理论方法与工程实践相融合, 打造匹配我国装备数字化工程规划、建设、应用、提升的实践方法、标准规范、工作流程; 建立面向装备全领域的认知域提升服务能力, 对实践方法、标准规范、工作流程等持续开展广泛的培训及推广服务。

### 4.2 数字化建设生态产品域治理

面向装备任务需求, 以模型、数据为二元载体, 覆盖不同层级、不同阶段、不同专业, 建立产品全生命周期模型标准, 规范不同阶段模型与数据交互接口, 形成需求下发、模型交付及产品面向需求的全过程管理及数据追溯能力; 结合装备工程产品全生命周期管理需求, 推动围绕模型的“建集评管用”能力建设; 建立面向装备领域的产品域提升服务能力, 持续对装备数字化建设的产品模型库、产品数据库进行治理。

### 4.3 数字化建设生态应用域治理

融合型号工程及数字化工程两大体系, 建立各工程《数字化研制要求》, 进一步结合工作流程、标准规范等手段, 细化数字化工程相关工作要求; 制定数字化工程实践评价方法及指标体系, 建立服务于评价的数据自动采集能力, 支持装备承制单位数字化工程实践评价; 建立面向全装备领域的应用域提升服务能力, 持续提升装备工程各层级参与单位的数字化工程实践效能。

### 4.4 数字化建设生态合作域治理

满足国内多任务/多目标/多主体并行等合作发展需求, 建立标准统一、知识充沛、工具完备、流程规范的多方合作基础服务平台; 建立有效的知识产权确认、保护、服务机制, 形成模型与数据共建共享服务能力; 建立面向全装备领域的合作域提升服务能力, 持续保证海陆空天不同领域单位能够基于高水平统一的基础能力平台开展跨领域任务合作。

## 5 结论与展望

数字化技术由“点→线→面→体”集成化、

融合化应用,工程复杂程度及技术实现难度成不断增长。虽然,我国在数字系统模型、数字孪生、单点自主工业软件等方面形成了基础技术能力,并在部分型号的试点工作中进行了实践验证,但总体来讲,我国航天装备领域的数字化工程建设仍处于技术的融合创新实践及集成方案探索阶段,必须建设航天装备数字化建设生态体系,才能有效赋能数字化工程的方案规划、能力建设、应用实践及持续改进过程,保障型号任务按规划推进。

### 参考文献

- [1] Office of the Deputy Assistant Secretary of Defense for Systems Engineering. DoD digital engineering strategy [R]. Washington, D.C.: U.S. DoD, 2018.
- [2] 郎彦辉, 李沐斋, 董凯. 推动装备数字化迈向发展新阶段[J]. 机器人产业, 2022(3): 24-28.
- [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] Tao F, Cheng J F, Qi Q L, et al. Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 94(9): 3563-3576.
- [5] Alam K M, El Saddik A. C2PS: a digital twin architecture reference model for the cloud-based cyber-physical systems[J]. IEEE Access, 2017, 5: 2050-2062.
- [6] Lee J, Bagheri B, Kao hung-an. A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems[J]. Manufacturing Letters, 2015, 3: 18-23.
- [7] Miller J A, Cardoso J, Silver G. System modelling and simulation[C]. Proceedings of the 35<sup>th</sup> Annual Simulation Symposium, San Deigo, CA, USA, 2002: 365-380.
- [8] 杨挺, 刘亚闯, 刘宇哲, 等. 信息物理系统技术现状分析与趋势综述[J]. 电子与信息学报, 2021, 43(12): 3393-3406.
- [9] Shangguan DS, Chen L P, Ding J W. A hierarchical digital twin model framework for dynamic cyber-physical system design[C]. Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Conference on Mechatronics and Robotics Engineering, Rome Italy. New York, NY, USA: ACM, 2019: 123-129.
- [10] Shangguan D S, Chen L P, Ding J W. A digital twin-based approach for the fault diagnosis and health monitoring of a complex satellite system[J]. Symmetry, 2020, 12(8): 1307.
- [11] Rajkumar R, Lee I, Sha L, et al. Cyber-physical systems: the next computing revolution[C]. Proceedings of the 47<sup>th</sup> Design Automation Conference, Anaheim, California. New York: ACM, 2010: 731-736.
- [12] 刘秀罗, 吴枫, 王佳, 等. 美军数字工程战略及进展研究[J]. 国防科技, 2022, 43(3): 27-35.
- [13] 张柏楠, 戚发轫, 邢涛, 等. 基于模型的载人航天器研制方法研究与实践[J]. 航空学报, 2020, 41(7): 023967.
- [14] 陆清, 吴双, 赵喆, 等. 数字孪生技术在飞机设计验证中的应用[J]. 民用飞机设计与研究, 2019(3): 1-8.
- [15] 何巍, 胡久辉, 赵婷, 等. 基于模型的运载火箭总体设计方法初探[J]. 导弹与航天运载技术, 2021(1): 12-17, 32.
- [16] 张霖, 王昆玉, 赖李媛君, 等. 基于建模仿真的体系工程[J]. 系统仿真学报, 2022, 34(2): 179-190.
- [17] 杨孟飞, 王磊, 顾斌, 等. CPS在航天器控制系统中的应用分析[J]. 空间控制技术与应用, 2012, 38(5): 8-13, 33.
- [18] Briese L E, Acquatella P, Schnepfer K. Multidisciplinary modeling and simulation framework for launch vehicle system dynamics and control[J]. Acta Astronautica, 2020, 170: 652-664.
- [19] 赵建军, 丁建完, 周凡利, 等. Modelica语言及其多领域统一建模与仿真机理[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(S2): 570-573.
- [20] Gao K F, Mei G, Piccialli F, et al. Julia language in machine learning: algorithms, applications, and open issues [J]. Computer Science Review, 2020, 37: 100254.
- [21] Besard T, Foket C, De Sutter B. Effective extensible programming: unleashing julia on GPUs[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2019, 30(4): 827-841.

引用格式: 赵民, 贾长伟, 张冶. 航天装备数字化建设研究与实践[J]. 宇航总体技术, 2023, 7(2): 27-34.

Citation: Zhao M, Jia C W, Zhang Y. Research and practice of space equipment digital construction [J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2023, 7(2): 27-34.