

产品化与数字化在航天领域的协同发展

张书玮 刘 祎 郭鑫宇*

北京航天万源科技有限公司, 北京 100176

[摘要]当前航天正处在由传统的研制方式向现代化产业转变的关键阶段, 而产品化与数字化是推动这一转型的两个重要方面, 在提高航天器研制水平上发挥着重要作用。本文对航天产品化所包含的标准、模块化、系列化进行了分析, 同时对航天数字化所涉及的数据、模型、智能进行探讨, 最后总结二者结合所带来的优势即一致性目标、互相配合的过程、成倍的效果。在此基础上, 本文提出基于数字孪生的产品全生命周期管理、模块化产品线和数字化研制平台的一体化、数据标准化及产品数据包的高度集成、智能算法使能产品自主运维与迭代更新四种主要融合方式。同时, 给出了从顶层规划、技术创新、组织协调以及生态环境建设四个方面促进其协同发展的一些建议。

[关键词]航天产品化; 航天数字化; 协同发展; 数字孪生

DOI: 10.33142/nsr.v3i1.19391

中图分类号: F426.5

文献标识码: A

The Synergistic Development of Productization and Digitization in the Aerospace Field

ZHANG Shuwei, LIU Yi, GUO Xinyu*

Beijing Aerospace Wanyuan Technology Co., Ltd., Beijing, 100176, China

Abstract: Currently, the aerospace industry is at a critical stage of transitioning from traditional development methods to modern industries, and productization and digitization are two important aspects driving this transformation, playing an important role in improving the level of spacecraft development. This article analyzes the standards, modularity, and serialization involved in aerospace productization, and explores the data, models, and intelligence involved in aerospace digitization. Finally, it summarizes the advantages of combining the two, namely consistency goals, collaborative processes, and exponential effects. On this basis, this article proposes four main integration methods: product lifecycle management based on digital twins, integration of modular product lines and digital development platforms, data standardization and high integration of product data packages, and intelligent algorithms enabling independent operation and iterative updates of products. At the same time, some suggestions were given to promote its coordinated development from four aspects: top-level planning, technological innovation, organizational coordination, and ecological environment construction.

Keywords: aerospace productization; digitalization of aerospace; collaborative development; digital twin

目前, 我国航天事业发展进入高频率发射、高负荷研制以及高难度任务同时进行的新时期, 在此情况下传统的以单件定制为主的航天研制方式已难以满足日益缩短的研发周期、不断提升的成本管控及不变甚至更高的产品质量可靠性的需求。而产品化和信息化是促进我国航天事业改革发展的两条重要途径, 正在改变我国航天科研生产的基本思路。产品化是以标准化、模块化、系列化来实现知识重用和规模化发展; 信息化是以数据、模型、智能化来进行全方位、全过程、全领域仿真和有效管理。二者呈现深度融合、互相促进的良好互动发展态势, 在推动中国航天事业发展方面有重大意义。

1 航天领域产品化与数字化的内涵与关系

1.1 航天产品化的核心: 标准化、模块化与系列化

航天产品化是以航天器研制由以往的“定制化”向“货架式”转变为基础, 利用知识重用提高工作效率的过程, 它包含三个方面: 标准化、模块化以及系列化。其中标准化是产品化的基础, 在此基础上制定统一的标准及规定, 打破各种型号之间界限, 中国航天科技集团公司第九研究院就曾对本单位涉及的主要专业产品进行总结归纳, 共整理出 191 种产品型谱, 淘汰将近 60%, 精简约 20%, 编制涉及多个方面的型谱, 总计有 2875 种规格^[1]。模块化是产品化的必然选择, 指把一个复杂的系统划分为若干具

有明确功能且相互之间有良好接口的模块。上海空间电源研究所提出“模块级、板卡级、固定项加配置项”思路，在一个平台上不同类型的电源控制器可根据客户需求通过不同标准模块进行搭配从而加快新产品研发速度。系列化是产品化的价值拓展，在相同产品平台上形成不同能力等级的产品族。五院在系统级优秀产品研制过程中，采取一致新型系统结构与外观设计，研制出技术领先、结构简洁、产品型号统一的系统级优秀产品设计方案。系列化的优点是，在不增加内部多样性的基础上满足外部不同需求。

1.2 航天数字化的核心：数据、模型与智能

航天数字化是在虚拟空间中建立对真实航天器全面模拟，数据、模型、智能是其三个主要组成部分，而数据是最基础组成单位，在八院 149 厂的质量数据包系统开发过程中，“工艺技术状态数据”“物资配套质量数据”“生产过程质量数据”“综合质量信息文档”，即围绕这四大业务领域开展相关工作形成对应质量主题域数据模型，实现 100% 的产品实物 BOM 即时生成能力，极大提高过去需花费一周时间完成人工编写报表效率至一天以内即可完成。模型是数字化的重要表现形式。八院 509 所将各种专业技术手段进行融合形成了一套“以模型代替文档、仿真保证质量、系统化理念重塑流程”的数字化设计理念，在此之上定义了一个标准的接口信号模型，使得各个子系统信号内容以及接口都是一致的，消除了信息孤岛现象。智能化是数字化更高层次的表现形式。一院 12 所开发出思源软件工厂平台，“天玄”航天领域的大模型被引入到智能化工具链里面，在软件的需求分析、设计中的问题预测、测试用例的设计以及对于比较复杂的故障进行排除等方面进行了广泛的应用。智能化的意义在于让数字化系统由原来的单纯的数据记录者转变为现在的能够提供帮助的意见提供建议的人。

2 产品化与数字化协同发展的内在逻辑

2.1 目标一致性：提升效率、可靠性与经济可承受性

产品化与数字化虽然方式不同，但是它们的目的是是一致的。从产品化的角度看，效率提高源于知识复用，771 所开展的产品化工作使得宇航集成电路设计时间和生产工艺时间都降低 25%，并且问题发生率降低了 27%。而从数字化的角度看，效率提高是由于信息透明度提升，509 所开发的 AIT 设计制造协同研制系统实现了总装单位与设计工程师之间数据可即时共享，从而大幅度提升了工作效率。而对于可靠性的改善，产品化是通过成熟的设计进行固化来避免因变化带来的质量问题，而数字化则是利用模拟仿真尽早发现潜在的问题。在经济上，产品化是大量采购

而降低元器件的成本，数字化是减少实物试验从而节约资源。目标一致使得产品化和数字化有天然的合作要求。

2.2 过程互补性：数字化设计推动产品化架构，产品化平台积累数字化资产。

一方面，数字化设计手段对产品化架构的设计起到支持作用。509 所在建立一个统一接口信号模型基础上，让电缆网设计就像导航一样，从起点对应信号连接器，做到“从设计到实施”无缝对接，使得模块化设计中接口一致性问题大大减少。另一方面，产品化平台有利于数字化资产积累。149 厂在阀类上固定 100 个参数并将其固定到 PDM 系统内，便于后续生产中需要这些信息进行传递。二者相互促进，形成良性互动。

2.3 效能倍增性：协同创造敏捷、柔性及智能的新型研制范式

当产品化与数字化由分离到融合时会产生 $1+1>2$ 的效果。敏捷是指对于任务需求的快速反应，12 所思源软件工厂提供了一套统一的软件开发平台以及一系列预制化的软件产品，在此基础上开发一套系统设计工具链使整个设计过程只需要几个小时即可完成。柔性是指在研制过程中可以根据需要灵活变更，上电所建设了一个可以实时监测并准确控制的综合产品集成平台实现了需求和资源之间的对应。智能是系统的自我进化的能力，通过对研制及使用过程中的大量信息进行不断学习，产品化平台能够自动发现设计问题并能够预知可能出现的问题。效能倍增性即产品化提供可以被数字化的“骨架”，而数字化给产品化带来不断进化“灵魂”。

3 协同发展的关键路径与融合点

3.1 基于数字孪生的产品全生命周期管理

数字孪生是产品化与数字化融合的最佳方式，在设计上数字孪生能够把产品的几何、非几何以及管理的信息都进行统一表示从而使得设计时的问题可以在前期就被发现；而在制造过程中，数字孪生是对设计模型进行再加工和完善，根据不同工序要求定义加工设备的信息、工装信息、工艺信息等^[2]。509 所进行的 AIT 设计制造协同研制就是数字孪生在制造方面的具体体现。在运维期间，数字孪生体可以对实物产品进行在轨精确仿真，509 所建立了高保真、超实时数字孪生体，在轨的姿态轨道控制、电源平衡、热控平衡等工作情况均能一一对应。

3.2 模块化产品线与数字化研制平台的统一

模块化产品线和数字化研制平台的一体化是达到“产品线即平台、平台即产品线”。上海空间电源研究所 28V 不调节母线平台为基础开发出 28V 不调节母线平台系列

电源产品；以 42V 不调节母线平台为基础开发出 42V 不调节母线平台系列电源产品；以 28V 全调节母线平台为基础开发出 28V 全调节母线平台系列电源产品；以 12V 不调节母线平台为基础开发出 12V 不调节母线平台系列电源产品，都可以针对不同的总体快速研制。509 所建立了基于 MBD 的数字化协同平台，在该平台上可以实现不同单位之间基于三维模型的协同设计及综合应用，形成统一、开放、共享的研究生产和管理环境。二者结合之后，工程师在平台上可直接选择产品线中的标准模块进行组合设计，而平台自动进行接口兼容性和功能仿真等。

3.3 数据标准化与产品数据包的深度融合

数据标准化是为了实现不同型号、不同单位间数据交换而制定统一标准。149 厂在数据结构化与标准化基础上进行工艺基础建设，在院所规定数据规范以及标准接口下，与院所合作建立起数据双方流通渠道，实现院内各所间数据包业务交流共享。产品数据包融合之前零散质量记录成为完整体系。149 厂实现实时数据流传输，水平连接设计、工艺、生产、检验、试验、现场、质量，垂直贯通总装、分系统、组件、材料来源信息。数据标准化让产品数据包可以流通到各个系统当中，而产品数据包又使得数据标准化具有实际应用价值。

3.4 智能算法赋能产品自主运维与升级

智能算法使得产品化与数字化进一步扩展到运维层面，在空间无人系统运维方面，研究人员提出了“云-边-场”的三层结构，云端负责大规模数据存储以及强大计算能力，边缘端利用联邦学习完成模型融合工作，现场端进行实时数据获取并进行主动故障诊断。“天玄”大模型接入智能化工具链之后，在软件需求分析、设计缺陷预测以及测试用例改进等方面都取得了良好效果。而智能算法对于产品的意义在于让产品具有不断学习并且不断提升自我的能力，让产品化平台不再是一个死板货柜，而是一个可以随时变化的知识库。

4 推进协同发展的策略

4.1 顶层设计策略：制定一体化发展规划与标准体系

促进产品化与数字化共同发展，在顶层规划上首先要有一致方向与路径。航天企业要编制包括产品化与数字化两方面的总体方案，确定共同发展的短期目标、重点工作以及资源配置等。

在规划过程中，要充分认识到产品化与数字化之间接口及相互依赖性，不能孤立进行产品化和数字化工作。九院在开展产品化工作中，制定了一系列如产品型谱管理、产

品成熟度定级管理、通用产品模块选用管理等规章制度及文件，共计 115 项，为产品化工作顺利开展奠定坚实基础。

标准体系建设是顶层设计的重要组成部分，在此基础上，航天企业应根据企业的实际情况以及产品的特点和要求，在国家和行业标准基础上制定出包括产品接口标准、数据交换标准、模型表示标准、产品质量标准等一套完整的标准体系^[3]。509 所正在进行数字孪生模型的设计、集成以及测试的标准规范的研究工作，以期建立标准化分层模型资产库来支撑数字卫星的大批量生产和交付。统一的整体规划能够使大家达成一致的认识，防止因局部最优而造成整体最差的情况发生。

4.2 技术融合策略：建设以数字主线为核心的一体化平台

技术融合是产品化、数字化协同发展的重要保障，主要工作是以数字主线为核心搭建一体化平台，打通产品定义数据、生产过程数据以及在轨运维数据之间的壁垒。所谓数字主线就是连接产品整个生命周期各个部分的数据关系，让数据能够从需求开始一直延伸到设计、从设计再到生产、最后从生产一直到运行的过程都能够顺利流通。509 所在努力打造覆盖协同设计、协同研制、测试验证、在轨管理的全过程数字化环境，做到全流程体系协同、全要素产品攻坚克难及全方位在轨服务支持，这也就是数字主线所要求的内容。

一体化平台建设需坚持“统一架构、分步实施、持续改进”。上电所依据 AOS 指南优化自身生产管理系统，在顶层层面定义业务域及其相互间的关系，进行端到端的梳理工作，形成符合业务架构发展的制度体系。同时，在平台建设中要解决影响整体协同的主要问题，逐步扩大范围，提高平台的成熟度以及可用性。

4.3 组织管理策略：构建跨域协同团队与敏捷管理流程

航天企业应尝试建立跨域协同团队，打破专业壁垒以及部门间的隔阂。五院在进行系统级优秀产品研制过程中，首次提出专业技术组、新平台项目组以及管理变革组协同工作机制，在研制工作、产品质量控制、人员配备、企业管理、供应链管理等方面制定了相关制度^[4]。而九院积极鼓励各分部建设以产品首席专家为依托的产品团队，组建了一支近 3000 人的产品化技术专家队伍，在促进协同方面起到了重要作用。

4.4 生态构建策略：培育开放协同的产业创新生态

建立开放协同的产业创新生态，实现上下游企业、科研院所、用户单位之间资源互通有无。上海空间电源研究

所以商业航天的供应链管理为突破口,开展基于供应链的科研生产方式,在低附加值环节进行外包,让专业的人做专业的事情。九院与所厂合作开展与总体或者用户单位一对一“结对子”的方式进行合作,693厂与用户单位结对子后形成22种产品系列,21项接口标准,产品型号规格减少约44%,促进开放协同的产业创新生态,需要航天企业由原来的封闭自给自足转变为开放的生态环境整合。

5 结束语

产品化与数字化融合发展是解决航天面临的高密度任务需求以及推动高质量发展的重要途径。从本文的研究可以看出,产品化以标准化、模块化、系列化为基础给数字化提供稳定的目标及基础,而数字化利用其数据、模型、智能化又反过来促进产品化的不断完善和发展。二者目标相同,在过程上互相配合,在效果上相得益彰,形成了快速、灵活、智能化的新一代航天生产方式。同时,伴随着未来数字孪生、人工智能、云边结合的发展,产品化与数

字化的结合将会越来越紧密。航天企业要以顶层设计为龙头、以技术融合为手段、以组织变革为基础、以生态建设为依托,推动两大体系建设同步发展,助力航天强国建设蓬勃发展。

[参考文献]

- [1]赵智丽,刘开平.新时代背景下航天领域预算管控与稽核模式的数字化转型探索[J].航天工业管理,2025(9):9-12.
- [2]凌绪强.我国航天领域数字化转型发展总体构想研究[J].航天技术与工程学报,2024,1(2):1-7.
- [3]季晓菲,岳晓飞,崔钰,等.航天领域三维数字化存档研究与应用实践[J].航天工业管理,2022(6):65-68.
- [4]凌绪强.我国航天领域数字化转型发展总体构想研究[J].航天技术与工程学报,2024,1(2):1-7.

作者简介:张书玮(1993.8—),毕业院校:北京工业大学,所学专业:机械工程,当前工作单位:北京航天万源科技有限公司,职务:工程师,职称级别:中级。