

数字工程研究综述

王林尧, 赵滢, 张仁杰

(中国航天系统科学与工程研究院, 北京 100037)

摘要: 数字工程是系统工程和基于模型的系统工程在数字化时代的延申, 其目的在于使用先进信息技术实现对现实世界对象的数字化表达, 以提高工程能力, 建立一个覆盖系统工程技术流程和管理流程的数字工程生态系统, 以提高效率, 节约成本, 提高工程质量。梳理了数字工程基本概念和关键技术, 研究分析国内外针对数字工程的研究动态与热点方向及应用现状, 重点识别当前数字工程应用中存在的问题, 形成改善意见与提升路径, 以期为我国重大工程项目数字化转型提供参考。

关键词: 系统工程; 数字工程; 基于模型的系统工程; 数字化转型

中图分类号: N945.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-5781(2023)02-0265-10

doi: 10.13383/j.cnki.jse.2023.02.13

Review of digital engineering research

Wang Linyao, Zhao Yan, Zhang Renjie

(China Aerospace Academy of Systems Science and Engineering, Beijing 100037, China)

Abstract: Digital engineering (DE) is the extension of Systems Engineering (SE) and Model-Based Systems Engineering (MBSE) in the digital era. Its purpose is to use advanced information technology to achieve the digital representation of real world objects to improve engineering capabilities and build a digital engineering ecosystem, which includes technical processes and management processes of SE, to reduce cost, improve engineering efficiency and quality. This paper sorts out the basic concepts and key technologies of digital engineering, and studies and analyzes the research trends and application status of digital engineering. Existing problems in the current application of digital engineering is identified, and improvement directions and promotion paths are suggested in order to provide reference for the digital transformation of major engineering projects in China.

Key words: systems engineering; digital engineering; MBSE; digital transformation

1 引言

新一代信息技术的跨越式发展推动了复杂产品研制过程的革命性创新, 产品复杂性、集成性和综合性特征日益提升, 为多学科融合的工程实践带来巨大挑战^[1,2]。传统烟囱式的信息传递方式以及线性的、以文本为中心的流程导致复杂系统的设计、交付、维护等环节难以灵活有效应对快速变化的不确定性需求, 甚至成为阻碍业务模式变革及业务能力提升的主要因素^[3,4]。此外, 基于文档的工程实践会在采办活动和决策过程中使用和产生大量非连续、非结构化的静态数据, 造成数据冗余, 甚至数据爆炸^[5]。数字工程的产生为解

决上述问题提供强有力支撑. 数字工程由美国国防部系统工程研究中心首次提出, 试图采用基于模型的系统工程(MBSE)实现传统系统工程和国防部采办流程的整体变革^[6]. 此后, 美国国防部发布《数字工程战略》, 正式定义数字工程概念: “一种综合数字方法, 使用权威的数据和模型作为跨学科传递的连续统一体, 支持从概念到部署的产品全生命周期活动的过程^[7].” 数字工程为实现 MBSE 提供技术基础, 是 MBSE 在数字化时代的深化, 也是传统系统工程理论方法的拓展. 本文以数字工程为切入点, 研究分析国内外数字工程研究动态、热点方向及应用现状, 重点识别当前数字工程应用中存在的问题, 形成具有针对性的改善意见与提升路径, 以期为中国数字工程生态体系建设及推动 MBSE 在大型项目研制中的应用提供决策参考.

2 数字工程

宁津生等^[8]将数字工程定义为计算机技术和地理信息技术结合的综合技术, 目的是实现地球相关数据的数字化、智能化、网络化与可视化. 而美国国防部认为数字工程是一种以系统模型为核心, 覆盖系统整个生命周期的集成数字方法. 有学者认为数字工程的核心关键在于建立一个安全可靠的数字工程生态系统, 并使用数据和模型取代文档在产品全生命周期内传递, 实现对现实世界对象的数字化表达, 从而提高工程能力.

数字工程生态系统是一个由相互关联的基础设施、环境和方法等要素组成的复杂系统. 数字工程生态系统不仅允许利益相关者从权威的真相源(authoritative source of truth, ASoT)交换数字工件^[9], 同时允许利益相关者在系统全生命周期快速查找、比对和使用来自不同阶段、不同部门产生的系统数据, 从而推动实现数字论证与数字交付. 其中, 数字工件是工程工件数字化的产物, 是信息和模型跨平台、跨生命周期和跨领域共享的关键. 工程工件可以是数字对象, 如模型、数据集、文档和图片等, 也可以是物理对象, 如物理产品或零件. 对于数字对象, 其数字工件就是其本身. 对于物理对象, 对应的数字工件可以是使用数字孪生生成的复杂模型, 也可以是图片或者文本, 甚至是一串文件编号用于与物理对象本身的属性和数字相关联.

尽管现有研究对于数字工程的定义不尽相同, 但均表现出共同的特点——以 MBSE、数字线索(digital thread)为基础进行的多方法集成, 实现全生命周期内的工程实践数字化. 基于上述分析, 本文结合系统工程与 MBSE 对数字工程内涵进行延伸. 从广义上讲, 数字工程是利用数字技术对工程进行数字化改造, 从而形成一套适用于数字时代的系统工程方法, 即数字系统工程. 数字系统工程的总体目标是开发在数字化、互联的工程环境、操作环境中的系统工程原则、理论、方法、模型和技术.

表1 数字工程优势
Table 1 Digital engineering advantages

数字工程优势	为什么数字工程能实现优势?
辅助专家决策	数字工程能在产品全生命周期内实时获取信息优化决策 数字工程拥有丰富的可视化和报告功能, 提高装备研发过程中的透明度
提升对新研装备达到预期能力目标的信心	数字工程可以在将新研装备交付前对其进行多视角多领域的原型设计、试验和测试 数字工程可以提供一个系统性的、严格的研究探索
提高效率	数字工程可以提供早期和持续的验证和确认, 以便提前发现缺陷、风险和问题 数字工程可以增进了解设计过程中因素(子系统)增加、移除、替换和整合对结果影响 数字工程采用模型验证和数字交付可以减少验证和测试 数字工程可以针对同一系统为不同的相关者提供合适的视图以改善沟通交流的效率 数字工程能够快速评估计划更改的影响, 在保留数据可追溯性的情况下自动更新数据 数字工程可以增强历史知识捕获和现有模型的可重用性, 以减少冗余和重复工作 数字工程可以使用标准化的模型和开放式架构进行迭代式更新可以缩短装备迭代周期
提高工程质量	数字工程可以在工程实践过程中提前进行风险控制 数字工程能保证需求传递的一致性, 数据和模型的可靠性、可追溯性、流程的透明性 数字工程的标准化的模型可以减少误解以提供准确一致的认知 数字工程可以增强在系统开发生命周期早期发现缺陷的能力

传统系统工程方法的数字化应用与基于模型的系统工程是数字工程的两大支柱^[3]。具体而言,前者是采用、集成新的数字技术的系统工程方法,强调通过数字化技术实现系统工程过程的规范化和信息化,提升系统工程的效率效能;后者侧重于以标准一致的形式化方法实现对工程工件的多视图模型化表达,实现需求-功能-逻辑-物理的一致性和追溯性。数字工程和传统系统工程的主要区别在于:1)在系统生命周期中使用权威真相源,在所有利益相关者之间共享数据,消除纸面合同数据需求列表和大规模设计评审的需要;2)在进行完整的物理系统开发前,设计在模型中进行集成和验证;3)使用权威真相源连续反馈信息进行任务效能优化;4)需求变得可传递,以增强关键性能参数。数字工程和基于模型的系统工程的主要区别在于:MBSE的重点在于使用形式化的系统模型(原理图模型)表达系统工程实践,并在全生命周期内传递;而数字工程的重点在于将更为广泛的模型(包括数字孪生模型、数学模型和3D模型等)作为在全生命周期中传递的连续统一体。

3 数字工程研究动态与应用现状

3.1 数字工程关键技术

数字工程以采用数字手段提高工程能力为第一目的,在不同工程项目中的技术体系有所区别但至少都包含着MBSE、数字线索和数字孪生三个方面。MBSE是连接用户需求与系统概念设计方案的重要方法;数字线索将数据和模型在正确的时间将正确的数据交给正确的人使用^[10];数字孪生是模拟系统在现实环境行为的关键技术。

1) 基于模型的系统工程(MBSE)。MBSE是建模的形式化应用,以支持系统需求、设计、分析、验证和确认活动,始于概念设计阶段,并持续到整个开发和生命周期后期阶段^[11]。MBSE中的模型通常指原理图模型,一般包括需求模型、功能模型和架构模型等,这些模型从不同视角描述同一个系统,并贯穿全生命周期^[12-14],其基本思想是使用形式化的标准模型协助相关系统工程从业人员进行系统工程实践^[15]。将传统的基于文档的方法转变为基于模型的方法,是MBSE与数字工程的典型特征。

当前MBSE方法论主要包括以SysML为建模语言的IBM Harmony SE, IBM RUB SE以及INCOSE的OOSEM;以SDL为建模语言的Vitech MBSE Methodology;以OPDs/OPL为建模语言的OPM。其中IBM Harmony SE和OOSEM的开发方法与V模型一致;RUP SE的开发方法属于面向对象的方法,与螺旋模型一致;Vitech MBSE Methodology的开发方法属于并行设计,与洋葱模型(增量模型)一致;OPM的开发方法属于面向对象/工程的方法^[16]。没有任何一种MBSE方法适用于所有系统,MBSE方法必须根据组织具体的开发方法和待开发的系统类型进行调整。

2) 数字线索。数字线索是一种可扩展的、组件化的和数据驱动的体系结构,它将产品生命周期中生成的信息链接在一起,以传递工程、制造、业务流程之间以及跨供应链的数据流^[17,18]。通过数字线索支持的系统环境封闭循环,制造商可以实现流程的实时分析和改进,工件、数据、模型的自动化创建和全过程跟踪^[19,20],进而实现传统“设计-制造-试验”模式向“设计-虚拟综合-数字制造-物理制造”模式的转变^[21],大大提高基于模型系统工程的实施水平。美国空军认为,系统工程将从基于文档到基于模型再到基于数字线索^[22]。

针对不同的业务需求,出现了许多不同的数字线索框架,包括生命周期信息管理框架与现有技术集成构成的LIFT(lifecycle information framework and technology)^[23,24];基于语义网络技术(semantic Web technology)的互操作性和集成框架(interoperability and integration framework)^[11];基于产品数据管理的产品数字空间管理框架^[25]等。

3) 数字孪生。数字孪生脱胎于物联网,是一种可以用很多先进技术实现的想法而不是一种特定的技术,不同的学者在不同的行业领域对其有着不同的解释。总而言之,数字孪生指在赛博空间(cyber space)建立一个与物理实体/系统实时连接的多领域多尺度的高保真模型^[26],该模型是一个真实反映物理规则并在产品整个生命周期内不断更新的数字实体。其目的在于使用数字模型模拟物理对象在现实环境中的行为。利用

高精度传感器、高速数据传输技术、高性能计算技术和高保真模型,数字孪生可以实时地在赛博空间中反映物理实体的真实状况.对赛博空间内的虚拟映像进行判断、分析、预测和优化,将仿真数据反馈回物理实体,可以实现对物理实体精确最优控制.利用数字孪生的实时监测和双向操作功能可以提高系统安全性和可靠性,降低系统维护成本,优化系统结构,改善系统质量,延长系统寿命,提高预测精度辅助决策和收集数据辅助系统设计^[27-32].Windham^[5,33]认为,“数字孪生是使用数字线索对已竣工系统建立的多物理、多尺度和概率模拟的虚拟模型”,当使用MBSE开发系统抵达V图的底部时,数字孪生模型会自然而然地形成.

除了上述关键技术外,数字工程还针对不同的行业融入不同的技术,以实现工程的数字化转型.例如融入开放式系统架构,实现武器装备的迭代式更新;融入VR技术,在虚拟环境中完成对人员的培训;融入认知技术提高人机交互效率;融入大数据分析技术辅助决策等.

3.2 数字工程研究现状

数字工程脱胎于数字工程战略,数字工程战略提出的愿景包括5个重点转型建设领域:数字模型构建与应用;数字资源管理授权;融合应用创新技术;建设数字生态环境;推进数字文化与人才建设^[34].在数字工程不断推行和实践中,学者们针对如何实现数字工程愿景及数字工程如何改进系统工程与工程实践等方面展开了大量研究.

3.2.1 如何建设数字工程生态系统方面

Ronald等^[35]研究了数字工程对模型的要求,提出了根据使用需求过程引出和定义系统模型需求的方法,描述了模型环境与MBSE其它组件的关系,描述了如何在数字工程环境中有效的使用MBSE.Marcel^[36]进行数字工程中心探路者项目,研究建立权威真相源的方法并探索其使用方式,Leigha^[37]论证使用SpaceNet Cloud充当权威数据源的可行性.Donna^[38]讨论了可视化和交互性的重要性,特别是可视化分析和交互式仪表盘在数字工程中的潜在作用,Azad^[39]提出了将数字孪生纳入MBSE的总体设想和基本原理,并阐述了仿真和物联网(IoT, internet of things)对MBSE的好处.Ogun等^[2]研究了如何使用RFLD(requirements, function, logical, physical)分析框架指导MBSE分解系统,并提出了数字工程运行框架,Mark等^[40]利用Zachman框架和SysML提供了一种正式的、基于模型的方法,用于指导企业范围内的改进,以实现空军数字化转型.Nicole等^[41-43]定义数字工程能力框架,阐述数字工程专业人员所需的知识、能力、技能和行为,为推进数字文化与人才建设提供指导范式.

3.2.2 数字工程如何改进系统工程

数字工程策略的应用将使工程从传统的“设计-建造-测试-修复”范式转变为新的数字化、基于模型的“集成分析-建造-测试-运行/维持”范式^[44].与数字工程对传统工程的影响类似,传统系统工程的项目管理、技术审查、风险控制和测试评估等方面也将随着数字工程的出现发生改变.

Vinodini等^[45-47]分别在美国空军分布式公共地面系统(AF DCGS)和CubeSat等项目中研究如何使用MBSE建立数字系统模型以及如何实现数字线索以改进系统工程和项目管理,促进信息交流.Edward^[48]提出一种形式化、规范化方法进行数字工程风险量化与控制.Warren^[7]通过从基于文档的技术审查过渡到基于模型的技术审查来提高效率.Rainer^[49]基于飞机发动机设计和装配领域的调查,提出并验证可能的工程辅助能力数字化方法.Donna等^[39]讨论现有系统工程领先指标(在基于文档的工程假设下开发)对数字(基于模型)工程的适应性.Tom等^[9]提出量化数字工程效益的框架以及评价企业数字工程转型进度的方法.

数字工程工具和流程将使测试与评估的效率和有效性发生重大转变,这将显著影响开发新系统的总体周期.系统地应用战略行动实施数字工程,利用协作知识掌握风险,将基于模型的工程解决方案转换为基于数字线索的方法改变了建模和测试的本质^[50,51].

为进一步使用数字技术改善工程实践和系统工程方法,本文在综合分析数字工程研究现状、复杂装备开发方法后对数字工程未来研究提出如下设想:1)模型转换机制研究.数字工程涉及多学科、多类型模型,

如何实现模型之间的相互转换(甚至自动转换)是降低数字工程应用难点,提高数字工程能力的核心关键。2) 复杂模型可信度评价研究。系统复杂性的增加和数字工程对模型精度的高要求导致了模型复杂性的增加。探索客观、实用和低成本复杂模型可信度评价方法是数字工程研究重点。3) 数字工程环境下的组织管理范式研究。数字工程生态系统中的信息传递由基于文本向基于数据和模型转变必然会对组织内部的组织管理模式产生冲击,如何在数字工程环境下进行组织管理是当前研究空白。4) 数字工程与其它技术融合研究。数字工程是一个开放框架,不断融合创新技术改善工程实践是其基本思想。5) 数字工程在非国防领域应用研究。探索总结数字工程在更多领域应用的优势、难点和效益是数字工程普及的关键。

3.3 数字工程应用现状

3.3.1 数字工程的应用

数字工程是美军数字化转型的核心方法,数字工程不仅涉及包括设计、试验、生产和运行在内的产品全生命周期,还涉及企业(部队)的数字化改革。因此当前数字工程的应用主要集中在复杂装备研制和国防、武装部队数字化改造两个方面。

美国海军司令部是最早开始系统工程转型的机构,旨在探索改变当前武器系统的设计、开发和验证方式的工程方法,目标是显著缩短系统开发周期。美海军使用 MBSE 作为主要集成机制为联邦体系信息架构提供权威真相源,减少了 18.4% 相关流程所需的人力成本。在福特级航母设计中资助并使用该船的 3D 数字模型来规划和消除电缆敷设、加热、通风和空调管道和其它元件的冲突。在减少零件、工作和返工以及易于组装的基础上,减少了施工工时;并基于飞行甲板建模和仿真减少了舰艇的兵力和登船人员,提高出勤率^[52]。

数字线索的出现促使陆军《飞行器技术描述报告内容标准》产生改变。未来的飞行器技术描述报告的范围将从多媒体文档链接到数字线索模型,首先用于开发无污染单板设计飞机,再逐步用于改进商业现货产品和传统飞行器的“纸质”报告^[53]。同时美国陆军专门建立一个客观框架,名为“集成的基于模型的工程环境”,以快速响应新出现的士兵技术需求,加强内部和外部组织之间的协作,通过数据驱动改进多目标决策,控制生命周期成本^[5]。

美国空军使用数字工程完成了对空军分布式公共地面系统的改造,综合使用数字工程流程、敏捷的软件开发、开放式系统架构等技术成功研发美空军第一架用 e 系列飞机——eT-7A 红鹰教练机。美空军以 e 表示在制造样机前采用了数字工程的武器装备。eT-7A 红鹰教练机在 36 个月内从概念设计过渡到首次飞行,首轮产品工程质量提升 75%,装配时间减少 80%,软件开发时间减少一半^[4,45]。

欧洲航天局完成数字工程中心探路者项目证明基于开放模型的工程环境愿景不仅在技术上可行,而且在实践中也很有用,能够满足实际工程需求。它可将航天器设计和运行的工作流程完全数字化。不仅可以逐步用模型取代文档,实现高水平的自动化,而且可以通过“单一真实来源”的概念提高质量和上市时间^[39]。

根据美国防部需求,洛马公司、雷神技术公司和 L3 哈里斯技术公司等国防武器装备承包商积极开始数字工程转型,采用现代化的系统建模技术和基于模型的流程实现未来武器的快速低成本研发以达到美国国防部数字工程战略目标。洛马公司在“竞速者”项目中验证 Startdrive 数字工程工具集,缩短对技术进行测试和确认的时间。雷神技术运用数字线索将产品从需求分析到模型检验的时长缩短至 9 个月,使公司将从设计到交付的时间缩短一半。同时基于数据和模型的需求传递可以减少重复工作、提高沟通效率,在数字环境中对产品性能进行论证并可视化可以增强各方对新产品的认识。L3 哈里斯技术公司综合使用数字工程和敏捷开发流程以加快产品开发速度,缩小开发团队规模。同时 L3 哈里斯与英国 BAE 系统公司使用逼真的 VR 技术在虚拟环境中对人们进行支持、培训。

3.3.2 数字工程应用面临的挑战

为实现数字工程五大战略,使用 MBSE 和数字技术更新工程实践,数字工程还面临许多挑战。1) 模型的标准化与跨学科模型的集成。数字工程核心在于采用动态的,以数据和模型为中心的流程取代线性的,以文

档为中心的流程在全生命周期内跨学科跨部门地传递. 涉及多学科、多领域的模型集成, 需要建立数据和模型跨部门和跨生命周期传递的标准, 需要确定使用系统模型表达具体系统工程流程、工程实践流程的规范.

2) 数据和模型的快速验证. 数字工程可以保证信息的可追溯性, 但如何快速验证修改后数据和模型的正确性, 减少因使用错误数据造成的返工是进一步提高效率、降低成本的关键.

3) 数据和模型的多视图表达和需求的一致性传递. 不同的利益相关者对模型的需求并不相同, 如何针对不同的使用者提供不同的视图表达以保持需求传递的一致性, 是数字工程的重点.

4) 信息获取. 数字工程所需要的形式化系统模型、数字孪生模型等数字工件对数据的数量和精度存在很大需求. 数据的质和量决定着数字工程建立的模型能否正确的表达现实中的流程和实际物理系统, 是保证模型精度的基础.

5) 数字工程人才储备不足. 数字工程的实施要求参与者都有足够的数字工程素养, 因为数字工程使用数据和模型取代纸质的文档的前提在于所有的参与者都能够了解模型所代表的具体流程和模型所对应的具体方法与要求.

4 数字工程应用困难解决措施

数字工程是充分利用快速发展的数字技术的一个重要体现, 它是基于模型的工程(MBE)的使能技术, 目的是利用数字技术对工程和系统工程方法进行数字化改造, 从而形成数字企业和一套适用于数字时代的系统工程方法, 而不仅仅是将之前的流程数字化. 因此, 数字工程改革具有使用数字工程实现工程的数字化改革、使用数字工程实现数字系统工程和培养符合数字工程愿景的人才三个目标.

4.1 工程的数字化改革

数字工程是工程数字化转型的目标, 工程的数字化改革的核心在于采用标准的数字工件映射工程工件, 在数字化环境或互联网环境中进行工程设计, 解决产品复杂度增加、集成级别增加、多学科耦合带来的兼容性和协作方面的挑战. 工程的数字化改革的核心在于: 1) 建立安全可靠的信息技术环境作为数字工程生态系统的基石; 2) 建立数据、模型传递和使用的通用规范; 3) 使用合适的系统分析模型和工具确定当前系统的业务架构、数据架构、物流、信息流和能力流等; 4) 寻找使能技术不断增强工程实践. 从本质上讲, 工程的数字化改革还是在强化对信息的获取、处理和使用.

4.2 数字系统工程

数字系统工程是在数字时代, 以系统思维、系统工程原则、和系统工程方法为指导, 融入新的数字技术的系统工程新发展. 数字工程对于系统工程实践的改变聚焦于使用数字化技术和基于数据和模型的方法提高系统工程实践过程的信息获取、处理和利用能力. 数字系统工程区别于传统系统工程的优势在于持续改善系统工程实践以及以模型驱动的风险分析.

1) 持续改善系统工程实践. 不成熟的技术和不成熟的需求是成本和进度超支的主要驱动因素, Edward^[48]引入了一种新的方法, 将传统的“设计-构建-测试-修复”转变为“整合-分析-设计-制造-测试-操作/持续改进”的系统工程范式, 以数字线索和数字孪生为基础, 充分利用可用的数字知识和数据, 将简化流程并最大限度地减少返工. 该范式可以使用任一生命周期内产生的数据改进系统的开发. 在整个生命周期中, 模型在虚拟空间中逐渐成熟, 且逐渐成为更有用的镜像, 从而实现虚拟测试、后勤运作和持续性保障.

2) 模型驱动的风险分析. 利用数字工程原理掌握风险可能是将系统工程的未来与过去区分开来的最重要的一个方面^[53], 通过创建和应用持久的权威真相来源, 可以改进风险下的工程实践和决策, 模型的形式化开发和应用能够在系统实际应用之前更全面的在虚拟空间探索解决方案. 采用权威数字代理模型和不确定性量化方法, 可以预测获得缺失信息的最佳方法, 以达到可接受的不确定性水平, 并最大限度地提高项目价值、掌握风险.

在生命周期的所有阶段拥有和应用标准化数字模型的关键在于严格应用不确定性量化工具和方法. 不确定性分析的重点是在基于风险的决策分析中明确量化满足系统及其组件设计要求(成本、进度、性能要求

和利润等)的裕度和不确定性. 关键决策点的裕度和不确定性量化可为之后的建模、方案设计和试验活动提供适当的数据来减少不确定性和风险. 这将重点从“基于监督”的方法转移到“基于评估”的方法, 在这种方法中, 量化的不确定性用于确定下一个最佳行动方案, 将风险降低到可接受的水平, 以确保项目的成功——控制风险, 而不仅仅是识别风险.

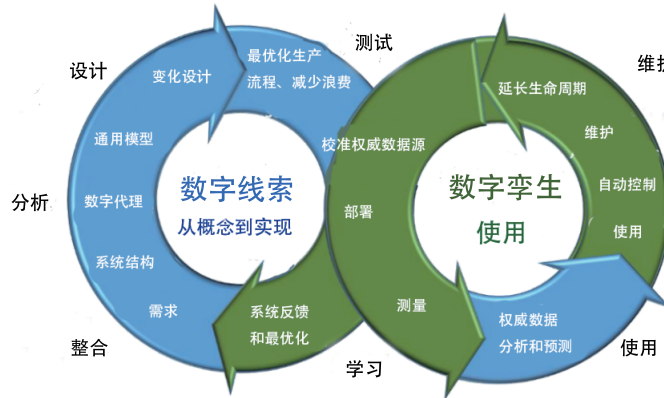


图 1 Edward框架

Fig. 1 Edward framework

4.3 数字人才建设

为高效地使用数字工程更新系统工程实践, 需要发展和维护一支精通基于模型的工程, 精通数字工程模型、方法、流程和工具, 了解整个采办生命周期数字工件的人才队伍. 明确各个职位所需要的技能并建立能力标准是针对性培养人才的基础.



图 2 数字工程能力框架

Fig. 2 The framework of digital engineering capability

对此, Adam 等^[41]研究提出了数字工程能力框架, 以衡量相关从业者的能力水平, 从而确定数字工程人才培训课程的重点内容. 数字工程能力框架总体结构包括能力群, 能力领域、能力熟练度以及专业技能. 能

力群表示具有相同目的和应用的能力领域所构成的集合;能力领域代表数字工程核心专业领域的相关技能的主要分组;员工的每个能力领域都将使用有意识、基础、中级、高级和专家五个熟练程度来表示.专业技能表述不同能力领域的不同熟练度下相关的知识、技能、能力和行为.

数字工程能力框架旨在全面概述个人在数字环境中所需的技能.最初的数字工程能力框架包括5个能力群,25个能力领域,659种专业技能.并非每一个数字工程专业人员都需要掌握所有专业技能,我们需要做的是根据组织和个人的发展需要,定制自己的发展路线.

5 结束语

《数字工程战略》的发布标志着数字技术和系统工程方法的融合走向成熟,数字工程致力于使用数字技术和模型化方法对工程进行数字化改造,从而形成一套适用于数字时代的系统工程方法.数字工程可以有效提高工程质量和效率,减少研发周期和研发成本,其核心技术包括MBSE、数字线索和数字孪生.数字工程的研究主要集中在如何实现数字工程愿景和如何使用数字技术改善系统工程两个方面,其应用已经逐步由国防领域扩散到工业界.当前我国数字技术和工程方法结合并不紧密,影响复杂装备高效、高质量研制,应围绕数字工程理论与实践逐步提升数字技术和工程方法融合水平,并针对不同行业融合创新技术,助力我国工程项目迈向数字时代.

参考文献:

- [1] Baker A, Pepe K, Hutchison N, et al. Enabling the digital transformation of the workforce: A digital engineering competency framework // 2021 IEEE International Systems Conference (SysCon). IEEE, 2021: 1–8.
- [2] Kargin Y O, Barnes A A, Uysal O D, et al. Digital enterprise across the lifecycle // AIAA Scitech 2021 Forum. 2021: 0240.
- [3] Huang J, Gheorghe A, Handley H, et al. Towards digital engineering: the advent of digital systems engineering. *International Journal of System of Systems Engineering*, 2020, 10(3): 234–261.
- [4] 崔艳林, 王巍巍, 王 乐. 美国数字工程战略实施途径. *航空动力*, 2021(4): 84–86.
Cui Y L, Wang W W, Wang L. US digital engineering implementation strategy. *Aerospace Power*, 2021(4): 84–86. (in Chinese)
- [5] Zimmerman P, Gilbert T, Salvatore F. Digital engineering transformation across the department of defense. *The Journal of Defense Modeling and Simulation*, 2019, 16(4): 325–338.
- [6] Sanchez S M, Lynch G E, Luhrs C, et al. Acquisition Research: Creating Synergy for Informed Change (May 8–9, 2019). Naval Postgraduate School, 2019: 1–21.
- [7] Department of Defense. Digital Engineering Strategy. Washington D.C., 2018: 1–36.
- [8] 边馥苓, 涂建光. 从 GIS 工程到数字工程. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2004(2): 95–99.
Bian F L, Tu J G. From GIS to Digital Engineering. *Journal of Wuhan University (Information Science Edition)*, 2004(2): 95–99. (in Chinese)
- [9] McDermott T. A framework to categorize the benefits and value of digital engineering. Acquisition Research Program, 2021: 1–24.
- [10] Bone M, Blackburn M, Kruse B, et al. Toward an interoperability and integration framework to enable digital thread. *Systems*, 2018, 6(4): 46–58.
- [11] Estefan J A. Survey of model-based systems engineering (MBSE) methodologies. IncoSE MBSE Focus Group, 2007, 25(8): 1–12.
- [12] 陈红涛, 邓昱晨, 袁建华, 等. 基于模型的系统工程的基本原理. *中国航天*, 2016(3): 18–23.
Chen H T, Deng Y C, Yuan J H, et al. Basic Principles of model-based systems engineering. *Aerospace China*, 2016(3): 18–23. (in Chinese)
- [13] 韩凤宇, 林益明, 范海涛. 基于模型的系统工程在航天器研制中的研究与实践. *航天器工程*, 2014, 23(3): 119–125.
Han F Y, Lin Y M, Fan H T. Research and practice of model-based systems engineering in spacecraft development. *Spacecraft Engineering*, 2014, 23(3): 119–125. (in Chinese)
- [14] Andersson H, Herzog E, Johansson G, et al. Experience from introducing unified modeling language/systems modeling language at saab aerosystems. *Systems Engineering*, 2010, 13(4): 369–380.

- [15] 朱 静, 杨 晖, 高亚辉, 等. 基于模型的系统工程概述. 航空发动机, 2016, 42(4): 12–16.
Zhu J, Yang H, Gao Y H, et al. Summary of model based system engineering. *Aeroengine*, 2016, 42(4): 12–16. (in Chinese)
- [16] Ramos A L, Ferreira J V, Barceló J. Model-based systems engineering: An emerging approach for modern systems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, 2011, 42(1): 101–111.
- [17] Singh V, Willcox K E. Engineering design with digital thread. *AIAA Journal*, 2018, 56(11): 4515–4528.
- [18] Friedenthal S, Moore A, Steiner R. *A Practical Guide to SysML: The Systems Modeling Language*. San Francisco: Morgan Kaufmann, 2014.
- [19] Hedberg T, Lubell J, Fischer L, et al. Testing the digital thread in support of model-based manufacturing and inspection. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 2016, 16(2): 021001.
- [20] David J, Jrvemp E, Lobov A. Digital threads via knowledge-based engineering systems // 2021 30th Conference of Open Innovations Association FRUCT. *IEEE*, 2021: 42–51.
- [21] 刘亚威. 数字线索助力美空军装备研制. 测控技术, 2018, 37(9): 1–4.
Liu Y W. Digital thread help US air force equipment development. *Measurement & Control Technology*, 2018, 37(9): 1–4. (in Chinese)
- [22] 刘亚威. 数字线索提升航空产品寿命周期决策能力// 2017年(第三届)中国航空科学技术大会论文集(下册). 2017: 134–137.
Liu Y W. Digital clues to improve the decision-making ability of aviation product life cycle // *Proceedings of the Third China Aeronautical Science and Technology Conference (Volume 2)*. 2017: 134–137. (in Chinese)
- [23] Bajaj M, Hedberg Jr T. System lifecycle handler—Spinning a digital thread for manufacturing // *INCOSE International Symposium*. 2018, 28(1): 1636–1650.
- [24] Hedberg T, Feeney A B, Helu M, et al. Toward a lifecycle information framework and technology in manufacturing. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 2017, 17(2): 1–13.
- [25] 耿建光, 李大林. 支持数字线索的产品数字空间管理框架研究与应用. 现代制造工程, 2022(2): 31–36.
Ge J G, Li D L. Research and application on product digital space management framework to support digital thread. *Modern Manufacturing Engineering*, 2022(2): 31–36. (in Chinese)
- [26] 刘大同, 郭 凯, 王本宽, 等. 数字孪生技术综述与展望. 仪器仪表学报, 2018, 39(11): 1–10.
Liu D T, Guo K, Wang B K, et al. Summary and perspective survey on digital twin technology. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(11): 1–10. (in Chinese)
- [27] Boschert S, Rosen R. Digital twin—The simulation aspect // *Mechatronic Futures*. Cham: Springer, 2016: 59–74.
- [28] Hribernik K A, Rabe L, Thoben K D, et al. The product avatar as a product-instance-centric information management concept. *International Journal of Product Lifecycle Management*, 2006, 1(4): 367–379.
- [29] 陶 飞, 刘蔚然, 刘检华, 等. 数字孪生及其应用探索. 计算机集成制造系统, 2018, 24(1): 1–18.
Tao F, Liu W R, Liu J H, et al. Digital twin and its potential application exploration. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2018, 24(1): 1–18. (in Chinese)
- [30] 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. 计算机集成制造系统, 2017, 23(4): 753–768.
Zhuang C B, Liu J H, Xiong H, et al. Connotation, architecture and trends of product digital twin. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2017, 23(4): 753–768. (in Chinese)
- [31] 陶 飞, 刘蔚然, 张 萌, 等. 数字孪生五维模型及十大领域应用. 计算机集成制造系统, 2019, 25(1): 1–18.
Tao F, Liu W R, Zhang M, et al. Five-dimension digital twin model and its ten applications. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2019, 25(1): 1–18. (in Chinese)
- [32] Cimino C, Negri E, Fumagalli L. Review of digital twin applications in manufacturing. *Computers in Industry*, 2019, 113: 103130.
- [33] Kraft, Edward M. The air force digital thread/digital twin-life cycle integration and use of computational and experimental knowledge // San Diego: 54th AIAA Aerospace Sciences Meeting. 2016: 0879.
- [34] 王 玮, 王 位, 石 峰, 等. 美国海军数字化转型战略综述. 舰船科学技术, 2021, 43(23): 170–175.
Wang W, Wang W, Shi F, et al. Review on US Navy digital transformation strategy. *Ship Science and Technology*, 2021, 43(23): 170–175. (in Chinese)
- [35] Giachetti R E, Vaneman W. Requirements for a system model in the context of digital engineering // 2021 IEEE International Systems Conference (SysCon). *IEEE*, 2021: 1–7.
- [36] Verhoef M, Gerené S, Vorobiev A, et al. Digital Engineering Hub Pathfinder // 2021 ACM/IEEE International Conference on Model Driven Engineering Languages and Systems Companion (MODELS–C). Piscataway: IEEE, 2021: 467–476.

- [37] Capra L, Hilton J, Bentley S, et al. SpaceNet cloud: Web-based modeling and simulation analysis for space exploration logistics // ASCEND 2021. Las Vegas, Nevada&Virtual: AIAA, 2021: 4068.
- [38] Rhodes D H, Rebentisch E, Moulton A. Adapting systems engineering leading indicators to the digital engineering & management paradigm. Acquisition Research Program, 2021: 1–23.
- [39] Madni A M, Madni C C, Lucero S D. Leveraging digital twin technology in model-based systems engineering. *Systems*, 2019, 7(1): 7–20.
- [40] Thomas Ford W C. Analyzing digital transformation using the Zachman framework and SysML. Acquisition Research Program, 2021: 1–23.
- [41] Hutchison N, Tao H Y S, Pepe K, et al. Digital transformation for defense acquisition: digital engineering competency framework (DECF). Acquisition Research Program, 2021: 1–21.
- [42] Baker A, Pepe K, Hutchison N, et al. Preparing the acquisition workforce: A digital engineering competency framework // 2020 IEEE International Systems Conference (SysCon). Piscataway: IEEE, 2020: 1–6.
- [43] Whitcomb C A, White C, Khan R, et al. The US department of defense systems engineering competency model // INCOSE International Symposium. 2017, 27(1): 214–228.
- [44] Kraft E M. Value creating decision analytics in a lifecycle digital engineering environment. AIAA SciTech 2019 Conference, San Diego: AIAA, 2019: 1–24.
- [45] Sundaram V, Brownlow L. MBSE based digital thread and digital system model for AF DCGS // 2018 AIAA Aerospace Sciences Meeting. Kissimmee, Florida: AIAA, 2018: 1217.
- [46] Honoré-Livermore E, Birkeland R, Bakken S, et al. Digital engineering development in an academic CubeSat project. *Journal of Aerospace Information Systems*, 2021: 1–12.
- [47] Graves R E. Digital engineering influences on formation flying technology development // Orlando: AIAA Scitech 2020 Forum. 2020: 1005.
- [48] Kraft E M. Digital engineering enabled systems engineering performance measures // Orlando: AIAA Scitech 2020 Forum. 2020: 0552.
- [49] Stark R, Brandenburg E, Lindow K. Characterization and application of assistance systems in digital engineering. *CIRP Annals*, 2021, 70(1): 131–134.
- [50] Luquin V, Lai A S, Latkin A W, et al. Safe and efficient flight test execution through digital engineering: High-fidelity loads regression prediction generation // AIAA Aviation 2021 Forum. 2021: 2805.
- [51] Kraft E M. Transforming ground and flight testing through digital engineering // AIAA Scitech 2020 Forum. Orlando: AIAA, 2020: 1840.
- [52] Voth J M, Sturtevant G H. Digital engineering: Expanding the advantage. *Journal of Marine Engineering & Technology*, 21.6 (2022): 355–363.
- [53] Calvert M E. Digital Engineering and US Army Air Vehicle Technical Description Reports // AIAA Scitech 2020 Forum. Orlando: AIAA, 2020: 323.

作者简介:

王林尧(1997—), 男, 重庆黔江人, 硕士生, 研究方向: 复杂系统理论与方法, Email: Geeliate@163.com;

赵 滢(1979—), 男, 河南南阳人, 博士, 研究员, 研究方向: 系统工程, Email: pindyck@126.com;

张仁杰(1995—), 男, 山东德州人, 博士生, 研究方向: 复杂系统理论, Email: 17865919628@139.com.