

1-18-2023

Development Opportunities and Application Prospects of Aero-Engine Simulation Technology under Digital Transformation

Jianguo Cao

Aero Engine Corporation of China, Beijing 100097, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Expert Manuscript is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Development Opportunities and Application Prospects of Aero-Engine Simulation Technology under Digital Transformation

Abstract

Abstract: The development of China's social economy and the improvement of its national defense capability in the new era put forward higher requirements for the development of aero-engines. It is urgent to promote the digital transformation of aero-engines in order to achieve coordinated, agile and efficient aero-engine development. Based on the current research and development of aero-engine in China, this paper clarifies the new connotation of "speediness and efficiency, accurate mapping, comprehensive coverage, and dynamic prediction" given by the development of emerging cutting-edge technologies to aero-engine simulation technology, as well as the new technical features of "spatio-temporal ubiquity, data driven, dynamic evolution, standardization and controllability, intelligence and high-efficiency". The technical framework of aero-engine simulation is put forward and analyzed, which is characterized by "full coverage of applications, efficient transmission of data, and full penetration of models". It also discussed the opportunities brought by the development of digital transformation in aero-engine simulation including authoritative data source construction, whole system model digital thread, fast numerical calculation, simulation credibility evaluation and dynamic evolution of the whole simulation process. The prospect of further application of aero-engine simulation technology in aero-engine development stage, such as requirement demonstration, collaborative development, operation and maintenance, is proposed under the digital transformation.

Keywords

aero-engine, simulation technology, digital transformation, artificial intelligence, big data, cloud computing, high performance computing

Recommended Citation

Jianguo Cao. Development Opportunities and Application Prospects of Aero-Engine Simulation Technology under Digital Transformation[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(1): 1-10.



曹建国 中国工程院院士，中国航空发动机集团有限公司董事长、党组书记。中国仿真学会理事长、中国科协航空发动机产学研联合体主席。曾任中国航天科工三院三部主任、中国航天科工三院院长、中国航天科工集团总经理等。长期从事系统仿真技术研究，以及航空航天技术研发和工程管理。获国家科技进步特等奖 1 项、二等奖 1 项；国防科技进步特等奖 3 项，一等奖 2 项。荣获国家级跨世纪学术带头人、航天十佳科技青年、中国青年科技创新十杰、全国优秀科技工作者、全国劳动模范等称号，享受国务院政府特殊津贴。

数字化转型下航空发动机仿真技术发展机遇及应用展望

曹建国

(中国航空发动机集团有限公司, 北京 100097)

摘要: 新时代我国社会经济的发展 and 国防能力的提升, 对航空发动机的发展提出了更高的要求, 亟需推进航空发动机数字化转型, 以实现航空发动机协同、敏捷、高效研制。结合我国航空发动机研发现状, 阐明了新兴前沿技术发展赋予航空发动机仿真技术“快速高效、精准映射、全面覆盖、动态预测”的新内涵, 以及具备的“时空泛在、数据驱动、动态演进、规范可控、智能高效”等新技术特征, 分析提出了“应用全域覆盖、数据高效传递、模型全面贯通”的航空发动机仿真技术框架, 论述了数字化转型给航空发动机仿真技术带来的权威数据源构建、全系统模型贯通、数值快速计算、仿真可信度评估和仿真全过程动态演进等发展机遇, 并对其在航空发动机的需求论证、协同研制、运行维护等研制阶段深度应用进行了展望。

关键词: 航空发动机; 仿真技术; 数字化转型; 人工智能; 大数据; 云计算; 高性能计算

中图分类号: V23; TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2023)01-0001-10

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.23-0040

引用格式: 曹建国. 数字化转型下航空发动机仿真技术发展机遇及应用展望[J]. 系统仿真学报, 2023, 35(1): 1-10.

Reference format: Cao Jianguo. Development Opportunities and Application Prospects of Aero-Engine Simulation Technology under Digital Transformation[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(1): 1-10.

Development Opportunities and Application Prospects of Aero-Engine Simulation Technology under Digital Transformation

Cao Jianguo

(Aero Engine Corporation of China, Beijing 100097, China)

Abstract: The development of China's social economy and the improvement of its national defense capability in the new era put forward higher requirements for the development of aero-engines. It is urgent to promote the digital transformation of aero-engines in order to achieve coordinated, agile and efficient aero-engine development. Based on the current research and development of aero-engine in China, this paper clarifies the new connotation of "speediness and efficiency, accurate mapping, comprehensive coverage, and dynamic prediction" given by the development of emerging cutting-edge technologies to aero-engine simulation technology, as well as the new technical features of "spatio-temporal ubiquity, data driven, dynamic evolution, standardization and controllability, intelligence and high-efficiency". The technical framework of aero-engine simulation is put forward and analyzed, which is characterized by "full coverage of applications, efficient transmission of data, and full penetration of

models". It also discussed the opportunities brought by the development of digital transformation in aero-engine simulation including authoritative data source construction, whole system model digital thread, fast numerical calculation, simulation credibility evaluation and dynamic evolution of the whole simulation process. The prospect of further application of aero-engine simulation technology in aero-engine development stage, such as requirement demonstration, collaborative development, operation and maintenance, is proposed under the digital transformation.

Keywords: aero-engine; simulation technology; digital transformation; artificial intelligence; big data; cloud computing; high performance computing

0 引言

航空发动机被誉为“现代工业皇冠上的明珠”，是一个国家科技水平和整体实力的集中体现，已成为我国实现制造强国的十大重点领域之一^[1]。在航空发动机研制全过程中，仿真技术一直发挥着提高研制效率和质量，减少实物试验反复，降低研制风险和成本，加快研制进程的重要作用。我国一直高度重视仿真技术的发展，目前已经具备了集仿真建模与仿真工程应用为一体的航空发动机研制能力^[2]。

当前，科技创新与产业换代之主的新一轮工业革命正在全球展开，国家“十四五”规划纲要明确提出，要加快建设制造强国、网络强国、数字中国，构建数字驱动的产业新生态，以数字化转型整体驱动生产方式变革^[3]。同时，我国社会经济的发展 and 国防能力的提升也对航空发动机的发展提出了更高的要求：航空发动机技术复杂程度和性能指标要求不断提高，产品研发难度日益增大，研制进度愈加紧迫。因此，亟需推进航空发动机数字化转型，以满足新时代航空发动机协同、敏捷、高效研制的需要。仿真技术作为支撑航空发动机数字化变革的核心基础^[4]，随着与相关新兴前沿技术(如人工智能、大数据、云计算、物联网、高性能计算等)的深度融合^[5]，必将迎来发展机遇，同时也会面临诸多挑战。

1 数字化转型下航空发动机仿真技术内涵和特征

在航空发动机数字化转型的需求牵引下，航空发动机仿真技术与新兴前沿技术深度融合^[6]，其技术内涵、技术框架将发生深刻的变化，体现出新的技术特征。

1.1 技术内涵

航空发动机仿真技术是建立在相似原理、模型理论、信息技术及领域专业技术基础上，以计算机和物理效应设备为载体构建系统模型，实现多层次、多物理场和多系统交互试验、分析、评估的综合性技术，旨在探索和掌握发动机复杂的系统特性、物理特性和行为特性，支撑方案分析优化、功能评估和技术决策。

航空发动机数字化转型以数据为核心，利用新一代数字技术实现全业务域数字要素和物理要素的系统整合^[7]，构建全感知、全联接、全场景、全智能的研发运营体系，进而创新和重塑传统管理模式、业务模式和商业模式，达到提升运营效率、增强体系韧性和创新性的目标^[8]。数字化转型需要准确描述、监控和预测产品全生命周期的状态，最大程度地挖掘仿真的应用价值并为其提供高可信的支撑。数字化转型下新兴前沿技术的高速发展与深度融合，赋予了航空发动机仿真技术新的内涵，航空发动机仿真技术将朝着快速高效、精准映射、全面覆盖、动态预测方向发展。为满足航空发动机这一复杂系统高性能、高可靠性的可信仿真需求，需从支撑技术、专业知识和应用技术 3 个层面协同发展^[9]，构建系统、完整的航空发动机仿真技术框架。

1.2 技术框架

航空发动机仿真技术框架要求仿真模型和数据贯通航空发动机全生命周期, 实现多物理场、部件到系统、虚拟世界到物理世界3个维度的实时、无界互联。现阶段, 航空发动机仿真技术主要集中于产品设计阶段, 各领域子系统仿真独立性明显, 模型、数据和软件工具的共享性、重用性以及物理实体的交联性有待提高。人工智能、语义分析、大数据、数据自治等新兴技术的发展开辟了仿真技术研究的新途径, 通过物联网泛在互联、大数据挖掘、异构数据语义分析、智能建模仿真促进了仿真范式向数据、模型联合驱动的新范式逐渐转变, 为航空发动机的全流程、全要素和全周期的全域仿真能力带来了新的发展契机。为实现仿真技术效能最大化, 应基于统一框架、标准规范和基础资源, 构建应用全域覆盖、数据高效传递、模型全面贯通的航空发动机仿真技术框架。数字化转型下航空发动机仿真技术框架如图1所示。

支撑技术为仿真能力的发展提供必需的环境条件。通过发展高性能计算和分布式计算, 为航空发动机仿真技术的广泛应用提供充沛的计算能力储备及高弹性的资源配置, 降低协作和模型传输过程中的风险, 支持短开发周期、低开发成本、高质量、高安全性地实现复杂仿真要素的跨域联合仿真能力构建, 为未来复杂仿真系统的构建和应用奠定技术基础。同时, 不断更新和开发方法、流程和工具, 融合人工智能、虚拟现实等技术, 构建具备动态演进特征的仿真平台, 支撑可视化、沉浸式决策的实现。

专业技术是实现仿真能力完备性和可信性的有力保障, 旨在为仿真技术的发展奠定良好的理论、方法及体系结构基础。基于权威数据源, 构建全系统贯通的发动机模型。针对全生命周期中的相关活动, 对各阶段仿真模型的正确性和有效性进行全面的校核、验证与确认, 系统性地发展仿真的理论、方法, 促使仿真系统的可信度满足量化决策的需求。同时, 在高性能计算和大数据等技术的支撑下, 发展大涡模拟等具备高可信度及动态演进特征的学科专业仿真技术, 构建具有领域权威性的、完备的、高可信性的仿真能力及标准体系, 为仿真技术在航空发动机研制活动中的发展及应用提供强有力的质量保证。

应用技术是推动仿真技术向工程实践转化的桥梁, 为产品全生命周期中仿真技术效能的发挥奠定基础。航空发动机全生命周期涵盖了需求论证、协同研制和运行维护等多阶段, 全天候全环境和整机系统等多层级, 流、固、热等多物理场, 领域及学科间仿真模型的异构性明显, 数据传递和更新的时效性要求高。因此, 需拓宽全业务领域的仿真能力, 实现仿真技术在产品全生命周期的覆盖, 以全面支撑生命周期各阶段的任务。

1.3 技术特征

在数字化转型中, 航空发动机仿真技术必然呈现新的发展态势, 将具备以下新技术特征:

(1) 时空泛在, 仿真贯穿航空发动机全生命周期。一方面, 受益于高性能计算能力的飞速发展, 仿真敏捷性不断提升, 成本逐渐降低, 仿真技术广泛应用在航空发动机需求论证、协同研制和运行维护过程; 另一方面, 仿真技术将覆盖气动、燃烧、强度、传热、声学等众多学科领域, 且向更真实模拟发动机使用场景的多物理场、多学科耦合方向发展。

(2) 数据驱动, 从“文档”向“数字模型”转变。一方面, 各研制阶段和多任务场景采集和映射的实时数据将贯穿于航空发动机全生命周期的仿真活动^[10], 并以此驱动仿真模型和仿真分析工作的不断更新和演进; 另一方面, 仿真模型的构建基于权威和连续一致的真相源数据, 使得所有利益相关方获得的模型和数据更加准确、完善、可信, 且在多专业、多领域间可重用、可追溯。

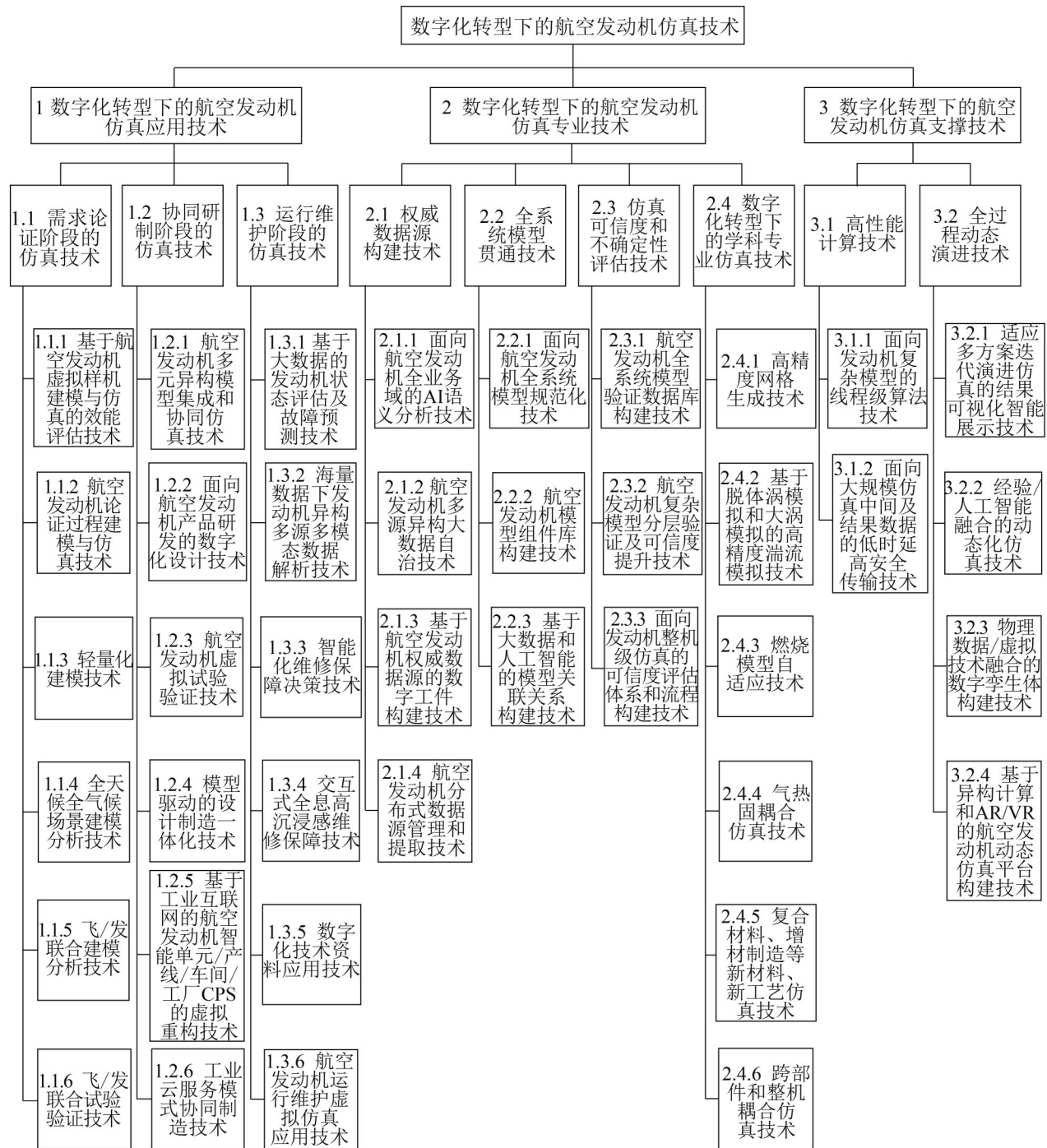


图1 数字化转型下航空发动机仿真技术框架

Fig. 1 Aero-engine simulation technology framework under digital transformation

(3) 动态演进，静态仿真向演进仿真发展。一方面，基于物理模型、传感器数据和历史数据，实现仿真模型的实时动态更新，使得仿真向虚实结合、动态演进方向发展；另一方面，航空发动机全生命周期模型不断进化，从稳态仿真向非稳态仿真发展，从而可以更深刻地揭示发动机物理机制，实现设计方案的快速迭代改进，同时也可实现服役状态的有效监测和管理。

(4) 规范可控，从“无序”仿真向“有序”仿真转变。一方面，航空发动机正向研发数据库的完善

和仿真可信度评价方法库的丰富, 支撑了仿真可信度评估标准和体系的构建; 另一方面, 仿真数据源和软硬件逐渐向规范化、协同化方向发展, 促进仿真环境更为安全、可靠。

(5) 智能高效, 仿真更加智慧、高效。一方面, 借助人工智能(AI)学习算法, 可对全生命周期、全业务域海量实时数据进行智能化清洗和治理, 自主构建和更新仿真动态模型, 提升航空发动机的动态感知、分析决策和智慧执行能力。另一方面, 基于人工智能实现仿真软件和硬件资源的自主优化调配和管理, 消除资源孤岛, 构建具备高效算力支撑、精准资源调度和敏捷数据整合能力的仿真平台。

2 数字化转型下航空发动机仿真技术的发展机遇

基于新一代人工智能、物联网、E级高性能计算和AR/VR等新兴技术的落地和赋能, 仿真支撑技术、专业知识和应用技术有望得到全方位的革新, 为航空发动机仿真权威数据源构建、全系统模型贯通、全尺度高精度快速计算、可信度和不确定性评估、全过程动态演进5个方向带来了新的发展机遇, 进而将彻底颠覆传统的研制模式, 助力航空发动机装备的数字化敏捷研制。

2.1 权威数据源构建

新时代航空发动机的敏捷研发模式迫切需要高质量、安全、权威的模型和数据, 以支撑各研制环节的无缝协同和高效迭代。但航空发动机产品研制活动的对象、过程和要素差异化明显, 各研制环节产生的海量、复杂模型和数据具有异构化、传递性差和可信度低等固有特征, 无法及时为各利益相关方提供最新、最权威的仿真模型和数据, 进而影响产品的研制质量和进度。

语义分析技术、数据自治技术和人工智能技术的发展与应用, 将为海量、无序、多源异构数据的自动识别、自适应配置、自动管理、自动调优、自动修复和航空发动机研制全业务域权威数据源的构建提供新的发展契机。借助语义分析和数据自治等新兴技术的赋能, 采用基于模型、面向对象和系统工程等多元化的数据源构建方法, 形成统一的模型和数据分类标准、设计规范和描述格式, 构建贯穿产品全生命周期任意时间点的结构化关联关系, 实现模型和数据的快速提取、跟踪、追溯和验证^[11]。在航空发动机研制的全生命周期, 为不同阶段的仿真活动提供准确、权威的模型和数据, 促进航空发动机仿真模型和数据的高效流转, 有效提升产品研发质量。

为构建持久、连续的权威数据源, 实现跨学科和跨产品全生命周期模型和数据的规范化及高效重用, 需将新兴技术同航空发动机研制活动全面融合发展, 催生出面向航空发动机全业务域的AI语义分析技术、多源异构大数据自治技术、基于航空发动机权威数据源的数字工件构建技术、航空发动机分布式数据源管理和提取技术等。

2.2 航空发动机全系统模型贯通

随着航空发动机系统复杂度不断提升, 涉及学科和相关方越来越多, 信息存储量和交互量呈爆炸式增长, 基于文档和多种自然语言的传统建模方法存在模型大量简化、语法/语义/规范歧义等多方面问题, 模型信息丢失严重, 接口一致性差, 重用性低^[12]。同时, 基于人工和有限数据的传统建模忽略了物理世界海量真实的环境、状态和演进过程信息, 不足以刻画实时演进的物理现实, 无法有效支撑航空发动机全系统、多任务场景的耦合仿真。

新一代的建模语言集成了面向对象和过程的可视化设计语言优势, 可形成覆盖航空发动机全生命周

期活动的统一建模语言标准,提升系统工程内部以及与其他学科的沟通效率^[13]。借助人工智能和大数据技术,可实现多任务场景、实时演进数据的智能化捕获和筛选,并基于新一代高效建模语言实现贯通航空发动机全系统的高精度、可重用和实时演进的结构、行为、需求以及参数模型的构建和仿真验证,有力支撑航空发动机复杂全系统的一体化建模仿真^[14]。

为实现航空发动机全系统模型的贯通,构建系统模型和仿真结果正向驱动的产品研发模式,需融合新一代建模语言、人工智能和大数据等新兴技术,催生出面向航空发动机全系统模型的规范化技术、航空发动机模型组件库构建技术、基于大数据和人工智能的模型关联关系构建技术等。

2.3 全尺度和高精度数值快速计算

在航空发动机仿真业务多元化、模型复杂化的背景下,现阶段广泛采用的线性逼近方法和串行/弱并行数值计算导致了仿真结果精度不足、可信度不高、计算效率低等问题,难以满足发动机整机/部件级全尺度模型仿真需求。同时,基于单机/多核微型计算机资源的传统发动机数值仿真计算简化了物理模型,以丢失部分功能细节的代价获得可收敛结果,难以满足新时代航空发动机高可信度的要求。

高性能计算是集成系统资源实现更大规模和更细致计算的科学,逐渐成为当代科技竞争的战略制高点,集中体现了一个国家的综合实力^[15]。当前高性能计算的热点是E级高性能计算(每秒可进行百亿亿次浮点运算的超级计算机),具有极高的并行计算能力,可高效解决一些航空发动机领域的计算难题,诸如全尺度航空发动机仿真、发动机环境模拟试验、发动机远程实时健康管理和湍流方程直接数值模拟等^[16]。同时,云计算是分布式计算、并行处理和网络计算等集成而来的新型计算模式,具备按时配置资源和共享资源的能力^[17],一方面可实现仿真软硬件资源的高弹性利用,另一方面可支持航空发动机设计团队在线优化模型精度和实时调整计算方向,支撑跨地域的航空发动机研发活动相关方展开协同研制仿真。

为实现复杂模型全尺度和高精度的快速数值计算,向航空发动机敏捷研发提供充沛的算力支撑和可靠的精度保障,需借助E级计算、云计算和边缘计算等新兴技术的赋能,催生出面向发动机复杂模型的线程级算法、面向大规模仿真中间及结果数据的低时延高安全传输技术等。

2.4 仿真可信度和不确定性评估

传统的航空发动机可信度评估主要针对特定应用场景进行,有针对仿真模型约束与实际的差异提出的可信度指数,也有针对仿真不确定性评估流程程序正确与否进行的仿真结果校核,缺乏发动机关注的直接对复杂结构部件开展的数值仿真可信度评估。同时,仿真校核数据欠缺和系统性不足,制约了仿真评估工作的全面开展,导致了仿真可信度评估无法闭环,评估结果无法得到广泛认同。

物联网基于先进传感器与高速通信、高性能计算等技术的深度融合^[18],具备智能感知、采集、传输及分析能力,能够主动反馈系统权威、足量的可信度评估结果。伴随人工智能技术的快速发展,神经网络模型的自我学习能力愈发强大^[19],通过AI技术的赋能可支撑仿真模型边界、仿真评价指标、测试数据等多层级验证系统的自主构建,进而形成智能化可信度评估规范流程^[20]。同时,在仿真不确定性评估方面,借助深度学习技术可以实现全误差源管理和误差不确定度量化,通过不同轮次仿真过程及结果、不同整机试验结果以及大量飞行试验结果关联关系的构建,修正仿真模型,确保仿真的可信度。

为更好地支撑航空发动机深入的仿真可信度和不确定性评估,实现贯穿全生命周期仿真活动质量的

提升, 需促进物联网、人工智能等新兴技术与航空发动机研制新模式的深度融合, 催生出航空发动机全系统模型验证数据库构建技术、航空发动机复杂模型分层验证及可信度提升技术、面向发动机整机级仿真的可信度评估体系和流程构建技术等。

2.5 仿真全过程动态演进

随着航空发动机正向研制的深入, 航空发动机数值仿真往往呈现出模型复杂和利益相关方众多的特征, 受限于仿真系统的弱智能化和信息技术能力的局限性, 仿真过程的变化主要通过预设子步或人为定义的方式展现模型变化, 或通过图片、报告输出的形式将静态结果传递给各方, 无法满足实时、多维度的需求, 不能达到量化决策要求。

数字孪生是沟通虚拟世界和物理世界的有效方法, 通过综合来自不同领域和设备知识, 能够利用数字模型、传感器数据和历史数据等反映与该模型对应实体的功能、实时状态及演变趋势等。在航空发动机研制中, 通过数字孪生方法建立小到每个零件、大到完整单元体的全数字化仿真模型, 结合增强现实(AR)/虚拟现实(VR)技术^[21], 跟踪模拟计算和优化过程; 同时, 基于先进物联网技术将数据注入数字孪生中, 实时修正仿真模型, 展现高可信的结果, 实现预测性设计、沉浸式体验、可视化决策的目标。

为实现航空发动机产品研制全过程仿真动态演进, 有效支撑项目可视化决策, 需融合数字孪生、AR/VR、物联网等新兴技术, 催生出适应多方案迭代演进仿真的结果可视化智能展示技术、经验/人工智能融合的动态化仿真技术、物理数据/虚拟技术融合的数字孪生体构建技术、基于异构计算和AR/VR的航空发动机动态仿真平台构建技术等。

3 数字化转型下航空发动机仿真技术的应用展望

仿真是数字化转型的基础, 在航空发动机数字化转型需求牵引下, 以贯穿航空发动机全生命周期的单一且权威的数据、模型为纽带, 依托数字化技术赋能, 推进航空发动机需求论证、协同研制、运行维护等领域的仿真应用。

3.1 需求论证

基于数字化转型下的航空发动机仿真技术, 将形成具备快速原型构建、多方案比较、基于数据决策等功能的论证仿真能力, 提高论证阶段对研制经费和周期的评估能力和对项目决策的支撑能力, 实现包括需求生成、备选方案分析、虚拟样机与评估等在内的基于数据驱动的辅助决策^[22], 在满足性能的基础上充分考虑经济可承受性、风险等多因素的影响, 达到减少后期的方案返工, 降低研制成本和缩短迭代周期的目的。

(1) 开展基于航空发动机虚拟样机建模与仿真的效能评估技术、航空发动机论证过程建模与仿真技术、轻量化建模技术等研究与应用, 实现与用户现有的工具、信息与设施进行集成, 获取用户对发动机型号的使命任务定义和需求, 形成海量备选方案; 根据预算、使命任务与需求对备选方案进行快速评估和决策, 并将评估和决策结果以易于理解的可视化等形式展现给用户, 用户可以利用从使命任务、需求、规划、预算、概念、评估、决策到制造整个过程的分析模型、知识与决策数据。在论证阶段以更高的可信度预测发动机性能及其背景环境, 开展技术方案权衡, 量化并降低项目风险, 确定项

目的弹性, 分析航空发动机不同技术方案和研制安排下, 概率事件对研制周期和经费可能带来的影响。

(2) 开展全天候全气候场景建模分析技术、飞/发联合建模分析技术、飞/发联合试验验证技术研究及应用, 使航空发动机不再作为孤立系统, 而是放置在具体的环境、场景下与飞机联合开展集成论证, 从而促使仿真技术向场景一体化、飞/发融合一体化论证发展。通过运用基于多学科优化技术的性能仿真, 理清交联关系和边界条件, 兼顾飞机/发动机的各系统、各专业的潜力, 充分考虑各学科之间的相互影响和耦合效应, 力求达到各学科之间平衡及飞发的共同成功。

3.2 协同研制

基于数字化转型下的航空发动机仿真技术, 将形成分布式部署、设计制造协同一体化的研制仿真能力, 形成航空发动机数字孪生研制模式, 实现基于权威数据的协同研制仿真, 实现各业务环节、各系统平台和制造资源之间的自主反馈和优化执行, 高效支撑航空发动机研制。

(1) 开展航空发动机多元异构模型集成和协同仿真技术、面向航空发动机产品研发的数字化设计技术、航空发动机虚拟试验验证技术等研究与应用, 发展统一框架、标准规范和基础资源^[23], 基于贯通上下游的权威数据模型, 通过物理实体和数字模型间海量、实时的数据交换和互动, 不断提升仿真模型的完整性、精确性和一致性^[24]。通过充分利用分布式部署的仿真数据和资源, 开展航空发动机各部件和系统的智能化协同研发。通过开展基于多学科耦合、多物理场联合的整机仿真, 提前暴露设计缺陷, 提高研制效率和质量。使用数值仿真手段对发动机试验对象和试验设备的试验行为表现进行预估、分析和验证, 使发动机试验从传统的以实物验证为主的“实物验证-改进实物-再试验”模式向以仿真为主的“试验建模-虚拟验证-改进模型-实物验证”模式转变。用实时的试验数据作为模型的输入, 用模型预测试验结果, 在提高仿真模型精度的同时拓宽试验的能力边界, 使得虚拟研制技术贯穿整个产品生命周期, 推动“仿在前面”的技术理念发展。

(2) 开展模型驱动的设计制造一体化技术、基于工业互联网的航空发动机智能单元/产线/车间/工厂 CPS 的虚拟重构技术、工业云服务模式协同制造技术等研究与应用, 构建包括铸造、塑性成形、焊接、增材制造、热处理、机加等多种制造工艺的航空发动机零部件全工艺链集成仿真平台, 实现制造工艺全流程的工艺方案和工艺参数的智能设计、全局优化, 减少航空发动机零部件的研制周期和成本, 提升制造质量和效率。开展基于交互式的航空发动机智能装配系统数据分析技术研究, 根据工装、产品尺寸等实物状态信息, 通过装配仿真构建与之对应的装配数字孪生, 开展装配结果的可视化预估, 分析不同装配方法对发动机整机及部组件性能的影响, 对发动机工作状态下的装配参数变化进行预测, 进行产品装配质量评价, 支撑零件设计的改进迭代。

3.3 运行维护

基于数字化转型下的航空发动机仿真技术, 将形成基于虚实交互的运行维护仿真能力, 提高对运行维护阶段发动机复杂系统物理特性和行为特性的认知水平和预测能力, 提升发动机健康管理水平, 实现基于虚实交互的运行维护。

(1) 开展基于大数据的发动机状态评估及故障预测技术、海量数据下发动机异构多源多模态数据解析技术等研究与应用, 将研制过程中形成的模型和数据与实际运行过程中收集的数据相结合, 形成虚实

融合、精准映射、动态更新的发动机数字孪生,在发动机运行阶段实时监测发动机的气动、热、循环周期载荷、振动、应力应变、环境温度、环境压力等运行参数和环境参数。数字孪生通过对上述飞行数据、历史维修报告和其他历史信息进行数据挖掘和文本挖掘,不断修正自身仿真模型,实时预测发动机的性能,进行故障诊断和报警。

(2) 开展智能化维修保障决策技术、交互式全息高沉浸感维修保障技术、数字化技术资料应用技术、航空发动机运行维护虚拟仿真应用技术等研究,借助VR/AR等虚拟现实技术,形成发动机运行维护电子手册,支持专家和维修人员的沉浸式交互,支撑维修方案的制订和虚拟维修训练的实施。提高维修备件管理水平,优化计划维修间隔拟定,实现航空发动机视情维修,提升航空发动机运行维护效能,实现航空发动机数字化运行维护系统应用,具备智能化管控能力。

4 结束语

航空发动机数字化转型是新时代高端装备产品研制的必经之路,仿真技术是航空发动机创新研发的必要手段,是实施航空发动机数字化转型的核心。航空发动机的数字化转型以及新兴技术及信息基础设施的蓬勃发展,为航空发动机仿真技术带来权威数据源构建、全系统模型贯通、数值快速计算、仿真可信度评估和仿真全过程动态演进等发展机遇,将朝着“快速高效、精准映射、全面覆盖、动态预测”方向发展。未来航空发动机仿真技术将具备“时空泛在、数据驱动、动态演进、规范可控、智能高效”等新技术特征;需要持续提高仿真的可信度,拓宽应用深度和广度,探索数字化转型中新型仿真服务模式,大力推进仿真技术在全生命周期中的应用,最终实现航空发动机“设计一步到位、试制一次做对、试验一次成功”。

参考文献:

- [1] 国务院. 国务院关于印发《中国制造2025》的通知(国发〔2015〕28号)[EB/OL]. (2015-05-19)[2022-12-20]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-05/19/content_9784.htm.
State Council. Notice of the State Council on Printing and Distributing Made in China 2025[EB/OL]. (2015-05-19)[2022-12-20]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-05/19/content_9784.htm.
- [2] 曹建国. 航空发动机仿真技术研究现状、挑战与展望[J]. 推进技术, 2018, 39(5): 961-970.
Cao Jianguo. Status, Challenges and Perspectives of Aero-Engine Simulation Technology[J]. Journal of Propulsion Technology, 2018, 39(5): 961-970.
- [3] 国务院. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要[EB/OL]. (2021-03-13)[2022-12-20]. http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm.
State Council. The Outline of the 14th Five-Year Plan (2021-2025) for National Economic and Social Development and Vision 2035 of the People's Republic of China[EB/OL]. (2021-03-13)[2022-12-20]. http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm.
- [4] Philomena (Phil) Zimmerman. Models, Simulations, and Digital Engineering in Systems Engineering Restructure[R]. 19th Annual NDIA Systems Engineering Conference, Springfield, Virginia, October 26, 2016.
- [5] 邱晓刚, 段红, 谢旭, 等. 我国仿真学科研究的发展历程与展望[J]. 系统仿真学报, 2021, 33(5): 1008-1018.
Qiu Xiaogang, Duan Hong, Xie Xu, et al. Development and Prospect of Simulation Research in China[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(5): 1008-1018.
- [6] Sundaram V, Brownlow L. MBSE Based Digital Thread and Digital System Model for AF DCGS[C]// 2018 AIAA Aerospace Sciences Meeting. Kissimmee, Florida: AIAA, Inc., 2018.
- [7] 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.
Liu Yawei. Take a Look at the U.S. Military's Digital Engineering Strategy-Embracing the Transformation of the Digital Age

- [J]. Science and Technology of China, 2018(3): 30-33.
- [8] 曹建国. 中国航发: 重塑业务价值提升核心竞争力[EB/OL]. (2021-01-05)[2022-12-20]. <http://www.sasac.gov.cn/n4470048/n13461446/n15927611/n15927638/n16135038/c16416302/content.html>.
Cao Jianguo. AECC: Reshaping Business Value and Enhancing Core Competitiveness[EB/OL]. (2021-01-05)[2022-12-20]. <http://www.sasac.gov.cn/n4470048/n13461446/n15927611/n15927638/n16135038/c16416302/content.html>.
- [9] 王贇, 蔡帆. 国外武器装备体系仿真技术综述[J]. 兵工自动化, 2015, 34(7): 15-20.
Wang Yun, Cai Fan. Review on Foreign Weapon System Simulation Technology[J]. Ordnance Industry Automation, 2015, 34(7): 15-20.
- [10] 胡晓峰. 大数据时代对建模仿真的挑战与思考[J]. 军事运筹与系统工程, 2013, 27(4): 5-12.
Hu Xiaofeng. Challenges and Thoughts on Modeling and Simulation in the Era of Big Data[J]. Military Operations Research and Systems Engineering, 2013, 27(4): 5-12.
- [11] Sun Xiaojian, Luo Mingqiang, Cui Zhiyang, et al. An Authoritative Source of Truth System for UCAV Conceptual Design[J]. IEEE Access (S2169-3536) 2021(9): 145317-145333.
- [12] 朱静, 杨晖, 高亚辉, 等. 基于模型的系统工程概述[J]. 航空发动机, 2016, 42(4): 12-16.
Zhu Jing, Yang Hui, Gao Yahui, et al. Summary of Model Based System Engineering[J]. Aeroengine, 2016, 42(4): 12-16.
- [13] 彭斯明, 肖刚, 于芹章, 等. 基于SysML的作战概念描述方法研究[J]. 系统仿真学报, 2021, 33(3): 604-612.
Peng Siming, Xiao Gang, Yu Qin Zhang, et al. Research on the Method of Operational Concept Description Based on SysML [J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(3): 604-612.
- [14] 刘金, 周振浩, 李艳雷, 等. 一体化实时仿真平台技术的发展与展望[J]. 导航定位与授时, 2015, 2(1): 66-71.
Liu Jin, Zhou Zhenhao, Li Yanlei, et al. Prospect and Development of Integration Real-Time Simulation Platform Technologies(IRSPT)[J]. Navigation Positioning & Timing, 2015, 2(1): 66-71.
- [15] 张冰, 马萍, 杨明. 新时代仿真面临的机遇与挑战[J]. 计算机仿真, 2020, 37(7): 1-3, 19.
Zhang Bing, Ma Ping, Yang Ming. Opportunities and Challenges Facing Simulation Technology in the New Era[J]. Computer Simulation, 2020, 37(7): 1-3, 19.
- [16] 张来平, 邓小刚, 何磊, 等. E级计算给CFD带来的机遇与挑战[J]. 空气动力学学报, 2016, 34(4): 405-417.
Zhang Laiping, Deng Xiaogang, He Lei, et al. The Opportunity and Grand Challenges in Computational Fluid Dynamics by Exascale Computing[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2016, 34(4): 405-417.
- [17] 罗军舟, 金嘉晖, 宋爱波, 等. 云计算: 体系架构与关键技术[J]. 通信学报, 2011, 32(7): 3-21.
Luo Junzhou, Jin Jiahui, Song Aibo, et al. Cloud Computing: Architecture and Key Technologies[J]. Journal on Communications, 2011, 32(7): 3-21.
- [18] 王保云. 物联网技术研究综述[J]. 电子测量与仪器学报, 2009, 23(12): 1-7
Wang Baoyun. Review on Internet of Things[J]. Journal of Electronic Measurement And Instrument, 2009, 23(12): 1-7
- [19] 周飞燕, 金林鹏, 董军. 卷积神经网络研究综述[J]. 计算机学报, 2017, 40(6): 1229-1251.
Zhou Feiyan, Jin Linpeng, Dong Jun. Review of Convolutional Neural Network[J]. Chinese Journal of Computers, 2017, 40(6): 1229-1251.
- [20] 朱霞, 张亚. 基于VV&A的仿真系统可信度评估方法研究[J]. 信息化研究, 2021(4): 63-69.
Zhu Xia, Zhang Ya. Research on Evaluation Method of Credibility of Simulation System Based on VV&A[J]. Information Research, 2021(4): 63-69.
- [21] 周忠, 周颐, 肖江剑. 虚拟现实增强技术综述[J]. 中国科学: 信息科学, 2015, 45(2): 157-180.
Zhou Zhong, Zhou Yi, Xiao Jiangjian. Survey on Augmented Virtual Environment and Augmented Reality[J]. Scientia Sinica Informationis, 2015, 45(2): 157-180.
- [22] 王爱文, 曲慧杨, 周军华, 等. 虚拟采办全寿命周期管理技术研究及应用[J]. 系统仿真学报, 2012, 24(10): 2126-2130.
Wang Aiwen, Qu Huiyang, Zhou Junhua, et al. Research and Application on SBA Life-Cycle Management Technology[J]. Journal of System Simulation, 2012, 24(10): 2126-2130.
- [23] 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.
Zhang Lin, Wang Kunyu, Laili Yuanjun, et al. Modeling & Simulation based System of Systems Engineering[J]. Journal of System Simulation, 2022, 34(2): 179-190.
- [24] Zhang Lin, Ye Fei, Laili Yuanjun, et al. X Language: An Integrated Intelligent Modeling and Simulation Language for Complex Products[C]// Annual Modeling and Simulation Conference 2021 (ANNSIM '21). Fairfax, VA, USA, 2021: 1-11.