

引文格式: 胡忠志, 曹文宇, 何皓, 等. 数字发动机技术现状、挑战及关键问题[J]. 航空制造技术, 2023, 66(21): 22-33.

HU Zhongzhi, CAO Wenyu, HE Ai, et al. Digital engine technology status, challenges and key issues[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(21): 22-33.

数字发动机技术现状、挑战及关键问题*

胡忠志, 曹文宇, 何皓, 尉舰巍, 刘凯, 杨佳利, 徐全勇

(清华大学航空发动机研究院, 北京 100084)

[摘要] 航空发动机设计仿真技术逐渐向综合化、集成化发展,同时伴随着系统工程方法论的完善,航空发动机领域的数字化变革方兴未艾。本文综述了航空发动机数字化概念、现状、需求和关键技术问题等内容,希望为我国航空发动机数字化变革提供参考和支持。面向航空发动机复杂性本质,分析了基于模型的系统工程、数字孪生、数字主线的概念和实质内涵,发展了数字发动机定义。针对技术趋势和挑战,总结了国内外数字发动机相关用例和发展现状,论述模型算法库、通用平台、数据连通和处理、耦合集成仿真技术、数据分析和决策等需要开展的工作。针对数字化转型的关键技术问题,讨论学科仿真集成方法、系统模型和学科模型的连通方法、数字孪生建模方法的国内外相关研究内容和方向。数字发动机的思路 and 具体研究内容可为后续规划和建设航空发动机数字孪生系统提供基础。

关键词: 航空发动机; 数字工程; 数字主线; 数字孪生; 基于模型的系统工程

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2023.21.022



胡忠志

博士, 研究员, 主要研究方向为数字发动机和控制系统。

航空发动机是多学科集成动力装置,需要满足诸多苛刻而又互相矛盾的综合指标要求,且长期处于严酷的工作环境,对技术研发和工程设计

挑战巨大。为满足飞机日益提升的性能需求和技术革新要求,新的航空发动机机构型和技术方案不断涌现,研发周期和成本提高,对航空发动机研发全流程都带来巨大的挑战。

航空发动机研发过程已形成贯彻系统工程理念的全生命周期流程并制定了相关规范,如美国 SAE (美国工程师协会)《ARP4754A 民用飞机和系统开发指南》,我国《民用航空发动机产品发展阶段管理细则(试行)》规定等。航空发动机产品的全生命周期阶段分为需求分析与定义阶段、设计阶段、制造阶段和运维阶段等。航空发动机的协作性和多学科性质,以及集成大量组件和相关模型的需求,亟须推进数字化进程实现和使用先进的系统工程方法和工具,有效地管理产品的复杂性。

目前仿真已经成为研发流程的

重要内容,无论是在设计研发阶段、制造实现阶段,还是集成验证阶段,仿真技术的引入成为缩短航空发动机研制周期的关键因素^[1]。随着仿真技术和数字化技术的进一步发展,航空发动机设计仿真技术逐渐向综合化、集成化和融合化方向发展,同时伴随系统工程方法论的进一步完善,整个航空发动机研发体系正在发生革命性变化。所有航发利益相关方正在急切地寻找基于模型的系统工程(MBSE)、数字孪生(Digital twin)和数字主线(Digital thread)相关的解决方案。

本文面向航空发动机领域数字化进程,发展了数字发动机概念,深入分析航空发动机数字化发展现状、挑战、需求和关键技术问题,为我国赶上数字化、智能化浪潮,抓住航空发动机研发体系变革机遇提供支持。

* 基金项目: 清华大学自主科研计划资助。

1 数字发动机定义

由于产品性能的要求高、开发风险和成本控制严格,航空工业一直是数字化变革的策源地和先行者。航空发动机相比飞机产品具有更显著的复杂性,主要表现为大量子系统和零组件之间的交互作用,需要在整个生命周期中被定义、指定和验证。另一方面,航空发动机各部分之间的动态相互作用和各种运行状态下动态特性,特别是涉及多个部件、多种同时发生的物理现象相互耦合,都导致从物理机制上准确、完整预测这些行为存在巨大挑战^[2]。考虑航空发动机的复杂性,航空发动机全生命周期必须以一致的方式处理和管理不同方式创建的大量数据,同时对不同级别的设计、制造和运维颗粒度,以及系统和子系统设计和集成的各种规程进行更详细的表达和描述,只有采用系统工程的过程和方法才能有效地管理这些多领域中多参与者和多层次的问题^[3]。

尽管行业在不断推进基于系统工程的数据管理体系和基于仿真的全生命周期流程,然而,由于航空发动机的复杂性,目前的研发体系并不能够满足未来的航空发动机的发展要求。来自于概念、知识、行为、意图、逻辑和关系等大量信息还没有在系统里得到体现和控制,多源数据和跨域模型的关联、集成和追溯性还缺乏管理,规范化和标准化的建模、驱动和重用流程尚未建立,面向需求的多学科的耦合集成仿真技术研究需加强,基于数据和智能的集成仿真与决策能力不够充分。大量的不确定性持续进入产品全生命周期,研发人员被消耗在程序性和事务性工作中,无法将精力投放在创新上^[4]。基于此,新的相互关联的概念和方法论不断提出,从不同角度推动数字化范式变革。

随着计算机和信息技术以及工程技术在各个领域的迅速发展,使用

面向对象的、可视化的系统建模语言描述系统的技术逐步成熟。MBSE以规范化的系统建模技术来支持系统需求、设计、分析、验证与确认活动,持续贯穿复杂产品的开发,可以有效地解决基于描述性文字信息的系统工程在数据交互和技术状态管理方面面临的问题,通过语言和工具提高了系统全周期信息表示的一致性^[5]。MBSE并不专注于解决特定学科的设计问题。系统建模语言实际上描述“关于数据的信息”,是一种管理数据、模型、存储库和模拟的工具,也能够对数据互操作性、交换、集成、链接、可追溯性、重用、转换、归档和同步进行定义。MBSE强调面向系统工程过程的建模,建模并形成系统需求、系统分析、系统设计、系统验证和其他过程中所涉及的分析元素的有机联系,在整个生命周期中保持系统信息的一致性和可追溯性^[6]。

数字主线引入了资源可共享(如传感器输出、计算工具、方法和流程)的数据通信架构,将来自产品生命周期所有阶段(如早期概念、设计、制造、运营、后寿命和退休)的信息链接起来,以实现实时和长期决策,也可认为是产品的主要或“权威”数据和通信平台^[7]。从数据角度看,实现的手段有标准化的数据定义、系统的权威语义表示、数据的清洗和挖掘等。从设计工具集成角度来看,实现的方法有链接数据、模型驱动和代码生成、基于标准的模型和数据交换(例如使用FMI和STEP)、基于元模型的转换等^[8]。

航空发动机几乎在每个学科领域和每个系统级别上都进行了数值模拟,以便能够详细探索设计空间和实现显著的性能改进。面向航空发动机仿真的关键是能否集成和耦合多层次、多领域结构和行为来准确描述系统特性,数字孪生的概念希望最终能够有一个高精度的航空发动机表达,在进入实物加工阶段之前就能

够对其进行虚拟的验证,确保设计决策正确,提高模拟和测试数据的可信度并减少试验,降低现场故障的数量并做出实时决策,利用高精度模型、实际使用数据和历史数据,在所有工况和环境下能够模拟现实世界的行为^[9-10]。高精度的模型并不意味着一定是基于物理机制的模型,也不意味着更高的维度或更小的尺度,更多地考虑满足要求的精度、分辨率、实时性和经济性等^[11]。在当前的数字孪生建模实践中,多数模型关注通过数据的融合降低模型的不确定性或进行决策。

以上的概念及其相关的方法论和工具对于工业产品具有普遍的适用性,然而,针对装备研发体系,考虑问题不能够单独割裂。2018年,美国国防部正式对外发布“国防部数字工程战略”,从更高数字化维度上统一集成了相关概念和方法论,涵盖了系统工程的技术流程和技术管理流程,以贯穿装备系统始终的系统模型、数字主线和数字孪生为核心,构建了以数字模型为中心的“数字工程生态系统”^[12]。尽管数字工程针对了整个装备工业体系,但具体实践过程中会因产品的不同而具有显著的差异性,数字化变革的核心是专家知识、系统表达和行为意图的数字化。

在产品全生命周期管理概念下,数字样机的定义(Digital Mock-Up)被广泛使用,即数字样机是对机械产品整机或具有独立功能的子系统的数字化描述,这种描述不仅反映了产品对象的几何属性,还至少在某一领域反映了产品对象的功能和性能(GB/T 26100—2010)。虽然广义的数字样机也涉及产品的功能和性能描述,但并不强调各个版本的完备性和统一性。针对航空发动机特定领域新的数字化趋势,我们进一步发展数字样机概念,提出“数字发动机”,其定义为基于统一完备的发动机系统建模表达构建的覆盖发动机生命

周期的跨层级、跨尺度、多学科模型和数据的集成,数字发动机可保证数据的可追溯性和一致性,实现高精度和高置信度的对发动机不同层级系统功能和行为的刻画、概括和集成的能力,为决策提供支持(图1)。能够支持完成数字发动机开发的数字化平台称为数字发动机平台。

2 发展现状

针对航空发动机领域的数字化和智能化发展,国内外都开展了相关实践活动,数字化贯穿航空发动机设计研发的全生命周期,正在改变航空发动机产品的设计、制造、集成与验证以及运维方式。目前基于模型的系统工程方法和工具正在航空发动机主流厂商中逐步得到应用,数字主线打通的统一协同平台和数据管理架构已经逐步形成规模,更新现有的仿真流程和模型库以形成多层次多视图一体化集成仿真能力已经初见成效,基于数据的模型和智能化决策

能力重要性正在获得广泛共识。数字发动机方向的应用和案例整理在表1中。

通用电气公司(GE)基于大量的历史数据和强大的研发经验,在20世纪90年代就开始了以PDM、

仿真流程建设为标志的研发数字化过程,逐步形成了基于流程和应用的全球协同设计体系,集成包括业务、使能和工程应用近2000个,主要实现3个典型特征:(1)通过增加工程和供应链功能之间的协作减少了周

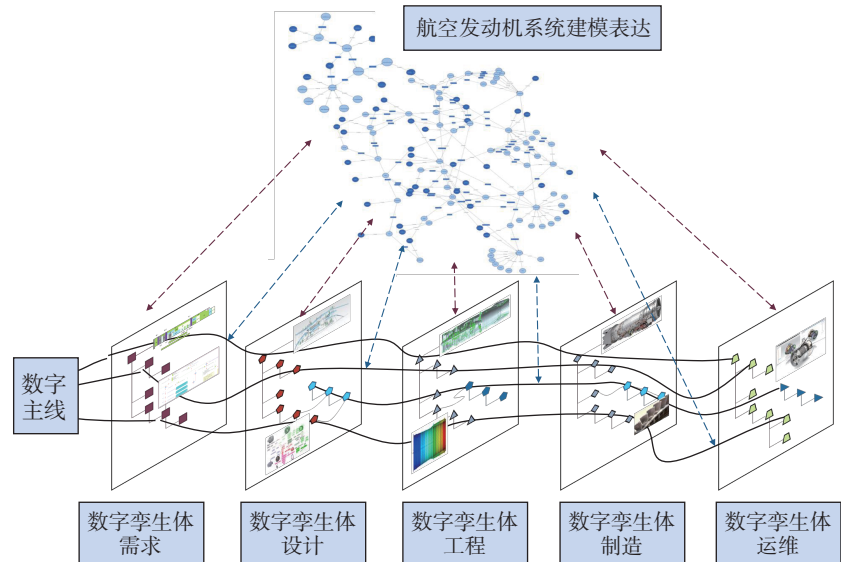


图1 数字发动机概念示意图

Fig.1 Digital engine concept diagram

表1 数字发动机应用和案例总结

Table 1 Summary of digital engine application and cases

方向	公司	应用	评价
MBSE	GE	正在研究高保真 MBSE 技术和工具链, 制定 MBSE 数字工程策略, 开发相关技术、工具和流程以提高安全性、弹性和周期时间, 开发体系工具以促进集成, 利用开源工具, 使得流程周期减少 50%, 验证和验收时间缩短为 1/10 ^[13]	目前相关工作刚刚开始, 整个思路与美军数字工程一致, 由研发中心推进, 技术成熟度有待提高
		将 MBSE 与基于特征的产品线工程结合起来, 进行数字结构需求的验证和数字结构语言功能的测试, 自动生成 T901 发动机控制器软件	通过分解需求形成的 MBSE 模型和学科模型的关联是核心内容, 在此方向上已取得竞争优势
	Rolls-Royce	正在使用 MBSE /SysML 来获取全权限控制系统和软件级别的需求, 形成 SysML 符号子集和模型控制系统建模标准; 推进针对系统和软件级模型执行自动验证脚本, 以确保一致性、正确性(在可能的情况下)和符合建模标准 ^[14] 针对 Ultrafan 发动机动力变速箱的滑油系统开展了 MBSE 建模, 将需求和定义集成到模型中, 实现安全性与建模集成(符合 ARP4754A 标准); 创建涵盖了完整的产品系统层次结构的联合模型; 联合模型中的每个单独模型都定义了一个基于功能和空间限制、故障传播和突发行行为所规定的系统架构, 允许此系统层次结构并行开发, 并支持迭代	关心 MBSE 需求分解与控制系统学科模型的交互标准; 在航空发动机的部分子系统进行了试点应用, 技术成熟度有待提高, 过程中关注开源软件使用, 有利于交互和协同 完整实现了发动机某系统的全部系统建模流程, MBSE 方法进入实质性部署阶段, 逐步进入新产品开发流程
	AG PAD	推进识别和描述当前 MBSE 标准和工具在支持行业数据交换方面的能力, 讨论数字孪生/数字主线业务体系结构和方法、标准的比较分析、战略和路线图, 探索多视图 BOM 和基于 3D 模型的定义等具体的实施措施; 通过数字化工具和基于模型的流程, 以及技术数据包的双向交换, 实现航空行业协作; 实现基于模型的系统工程(MBSE)概念设计过程, 评估在协作产品开发活动中交换数字需求和系统架构模型	本项目的最大意义是一致确认数据交换、业务体系和实施方法必须要由行业主导和定义, 而不是由软件商来主导

续表 1

方向	公司	应用	评价
数字主线	GE	<p>Digital thread for design 可以根据工程工作流程快速创建人工智能代理模型,同时对模型相关的数据进行协同化和线程化,该项目专注于将能力应用于设计、模型、仿真的每个用例,使其快速地部署和搜索,同时实现与现有的产品全生命周期数据库系统整合,实现 workflow 或代理模型的自动化</p> <p>使用传感器和大数据分析来提高制造的速度和效率,通过 Digital thread 设计连接设计和制造端。设计以数字方式传输到制造工程,对流程进行虚拟建模和模拟,工厂流程和布局、制造控制也将被模拟和优化;一旦设计和流程被虚拟验证,数据就会被传输到智能工厂,把数据转换成零件或产品,通过实时数字化连接,以实现最佳的生产控制和物流</p>	<p>特别强调机器学习代理模型的使用,通过机理模型和大量数据累积训练可以实现快速甚至实时的部署,形成快速迭代和决策</p> <p>打通设计和制造端的鸿沟,实现设计-工艺一体化分析和全流程模拟,特别是对制造策略和成本进行优化,可以获得较大收益</p>
	Pratt & Whitney	<p>采用 MBSE 和数字主线方法、标准和工具,提出通过数字主线使能数字孪生的平台架构,强调标准化语义和开放服务架构解决工具互操作性和集成问题;利用语义集成和开放服务架构来跨越功能孤岛的数字孪生^[15]</p> <p>推进互联工厂(Connected factory)试点项目,通过构建数字主线推动更高水平的流程能力,采用精益原则进行优化,在适当的情况下实现自动化,并在一个连接的环境中收集数据、运行分析,并向运营商和领导者提供实时信息</p>	<p>提出了整体的航发数字化架构,与现有 PLM 体系具备继承性,与数字工程思路一脉相承,提出语义集成和开放服务架构的重要性,可以为国内借鉴</p> <p>在现有体系下的进一步发展,谨慎推进,降低了生产过程中的成本,但部署成本较高</p>
	Safran	<p>建立起面向行为式数字化样机(Behavioral digital engine)技术,实现从初步设计到详细验证和验收全生命周期的设计-分析一体化平台,对异构环境数据共享和交换行为的规范以及多信息系统的集成应用进行开发,打通数据集成链条^[2]</p>	<p>关注系统建模、构型管理和设计-仿真一体化问题,实现了基于某型航空发动机的全流程数字主线技术,完成度较高</p>
数字孪生	GE	<p>在航空喷气发动机和涡轮螺旋桨发动机的使用中收集喷气发动机的数据,并结合物理模型来预测故障和频率^[16-17];创建了基于性能模型的数字孪生模型,监控发动机性能,预测维护问题,全寿命周期降低成本,包括 GEnx、GE90、CF6 和 CF34 以及 CFM56 和 LEAP 发动机</p>	<p>数字孪生目前最主流的应用,通过数据收集降低机理模型不确定度,减少了航空发动机维修、维护成本,但该技术本身对发动机物理模型的精度有一定依赖</p>
	Pratt & Whitney	<p>通过 EngineWise 平台开展高级诊断和发动机监测服务,使用网络化软件工具,为 8000 多台在用发动机提供健康数据分析,该公司及其发动机运营商可以使用预测性人工智能提出建议的推力</p> <p>针对服役的 F119 发动机,建立其数字孪生模型,预测部件的使用寿命增长 20%,通过推迟某些部件的更换,在飞机的生命周期内节省 8 亿美元成本或提取更多的发动机性能。使用敏捷软件开发方法完成了 DEEC 软件更新,包括回归测试和 100 h 验证,提高了 F-22 飞行包线内特定区域的性能</p>	<p>与通用公司平台功能相同,最容易获得收益的应用方向</p> <p>军用发动机的数字孪生典型用例,除了实现对现有发动机延寿之外,还能实现寿命和高性能的权衡</p>
	Rolls-Royce	<p>提出“Intelligent engine”平台,建立双向信息流以获得发动机运行环境,为每台发动机量身定制运行和维护建议;通过人工智能和高级分析支持智能化决策和实现自我维护</p> <p>为赢得 B-52 换发合同,建立 F130 发动机数字化在翼模型,以数字方式将该发动机集成到吊舱、挂塔和机翼中,并动态模拟整个操作系统,为客户准确模拟该产品在机翼上的效率并展示了维护工作</p>	<p>三大民用发动机公司均提供相关服务,也是数字孪生典型应用</p> <p>数字孪生的可视化方向应用,让客户可以直观了解整个换发过程及风险;可视化是数字孪生很重要的发展方向</p>
	Safran	<p>针对涡扇发动机,构建用于分析的小型数字孪生解决方案;使用新的集群技术和调整算法,降低观察维度来进行数学计算;使用自编码器神经网络和聚类分析在计算机集群上并行部署^[18]</p>	<p>演示项目,技术成熟度待进一步提升,算法具有一定参考意义</p>
	UEC	<p>提出基于数字平台的数字孪生架构,在考虑需求矩阵的情况下,将不同程度的复杂性引入到数字模型,能够完成认证并预测发动机运行;在 TV7-117ST 发动机、AI222-25 发动机上实施了试点项目^[19]</p>	<p>在现有设计体系之上提出了完整的数字孪生架构,基于真实型号进行了试点应用,但实际效果待进一步验证</p>

期时间；(2)由一个通用的用户界面驱动,保证了统一的体验和共享的数字参考,确保每个涉众都在相关的上下文中处理最新的信息,优化了客户需求及时响应时间；(3)以数据为中心的基本原理和直观的搜索功能,提高了生产率,简化了数据管理,促进了跨边界的高效信息共享。在成熟的数字化设计体系基础上,通用公司的发动机研发体系正在进行蓬勃的更新换代,通过高保真 MBSE 技术和工具链工程进一步缩短设计和认证周期^[13]。

通用电气公司开工业互联网先河推出了 Predix 平台,通过 Predix 平台的部署深入地开展数字发动机的相关工作。平台提供以工业设备数据映射、分析为主线的信息传递能力,形成强大的对工业应用 APP 的支撑能力,发展多层级的从工业互联网基础设施服务、平台到软件及服务的云架构,依靠全生命周期数字主线,所有数据模型都能够双向沟通,因此真实物理产品的状态和参数将通过与智能生产系统集成的物理系统向数字化模型反馈,使生命周期各个环节的数字化模型保持一致,从而能够实现动态、实时评估系统的当前及未来的功能和性能。平台通过数字化模型,可以在虚拟环境下实现调试、试验和优化其运行状态,形成针对特定单个产品的数字孪生。在运维过程中,针对在翼发动机建立数字孪生模型,构建了机队监测、诊断和健康管理的框架,实现了故障隔离、故障检测和量化的功能^[16-17]。

在大量的专业模型积累的基础上,设计数字主线(Digital thread for design, DT4D)是通用公司正在发展的能力,可以根据工作流程快速创建人工智能代理模型,同时对模型相关的数据进行协同化和线程化,该项目专注于将 DT4D 能力应用于设计、模型和仿真的每个用例,使其快速部署和搜索,同时实现与现有的产品全

生命周期数据库(PLM)系统整合,实现工作流和代理模型的自动化,如图 2 所示。

普惠公司(Pratt & Whitney)在成熟的研发体系的基础上,使用数字工程作为连接不同工具和优化自动化的一种方式,正在通过数字主线形成跨多个领域集成,同时采用基于模型的系统工程与上下游客户和供应商形成协同,成功推进体系革新,形成了数字发动机平台的架构,如图 3 所示^[15]。面对设计和制造信息的鸿沟,普惠推进了互联工厂项目,进一步落实数字主线的落地。

EngineWise 平台创建于 2017 年,包括先进诊断和发动机监测系统(ADEM),这是一款使用网络支持、具有发动机健康管理服务的软件工具,为其民用航空发动机的在线监测、预测和决策提供支持。在军用发动机方面,依托设计数据开展数字孪生建模,通过软件更新提升使用性能、可靠性和寿命。针对航空发动机的典型部件,通过需求和系统架构的 MBSE 建模来串联相关领域模型,促进部件迭代开发。

罗·罗(Rolls-Royce)公司发展和完善了产品数据在数字主线中上下传递的解决方案,在制造和服务阶段获得工程设计和定义的数据,希望

所有用户都可以在任何一点上看到单个设计的相同状态,广泛应用于其民用发动机的在线监测、预测和决策中。在军用发动机方面依据设计数据开展相应数字孪生建模工作,提升使用性能、可靠性和寿命。罗·罗重点关注采用先进的数据分析、工业人工智能和机器学习,以加速新的数据分析和服的发展,从数据中释放新的价值,将最新的分析技术与行业知识和工程专业知识相结合,更好地支持客户。罗·罗通过航发运营生成大量的数据,进行大量的数据分析,进而创造一个数字孪生的发动机来提供更丰富的数据集,通过专家知识和数据分析方法将其构建、测试、决策,然后传递给用户。数字孪生是罗·罗“智能引擎”愿景的一部分,该愿景将物理发动机与维护服务和数字技术无缝结合。

为加强泛企业环境下飞机多学科系统集成和整机数字建模协同能力,减少对物理试验的依赖,加快产品研发流程,2009 年由欧盟委员会资助,空客公司主导,来自 13 个国家的 59 个合作伙伴及科研机构团队跨地域协作,发起了基于仿真驱动设计优化理念的飞行器协同设计应用项目——CRESCENDO (Collaborative and robust engineering

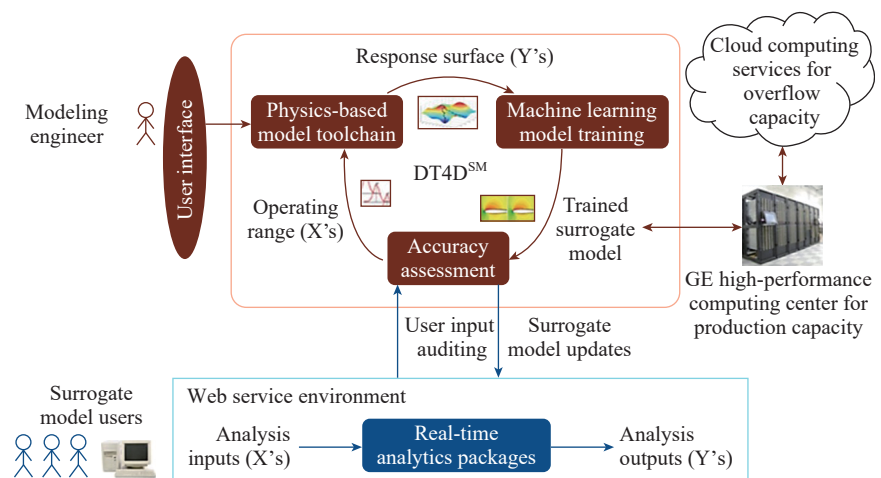
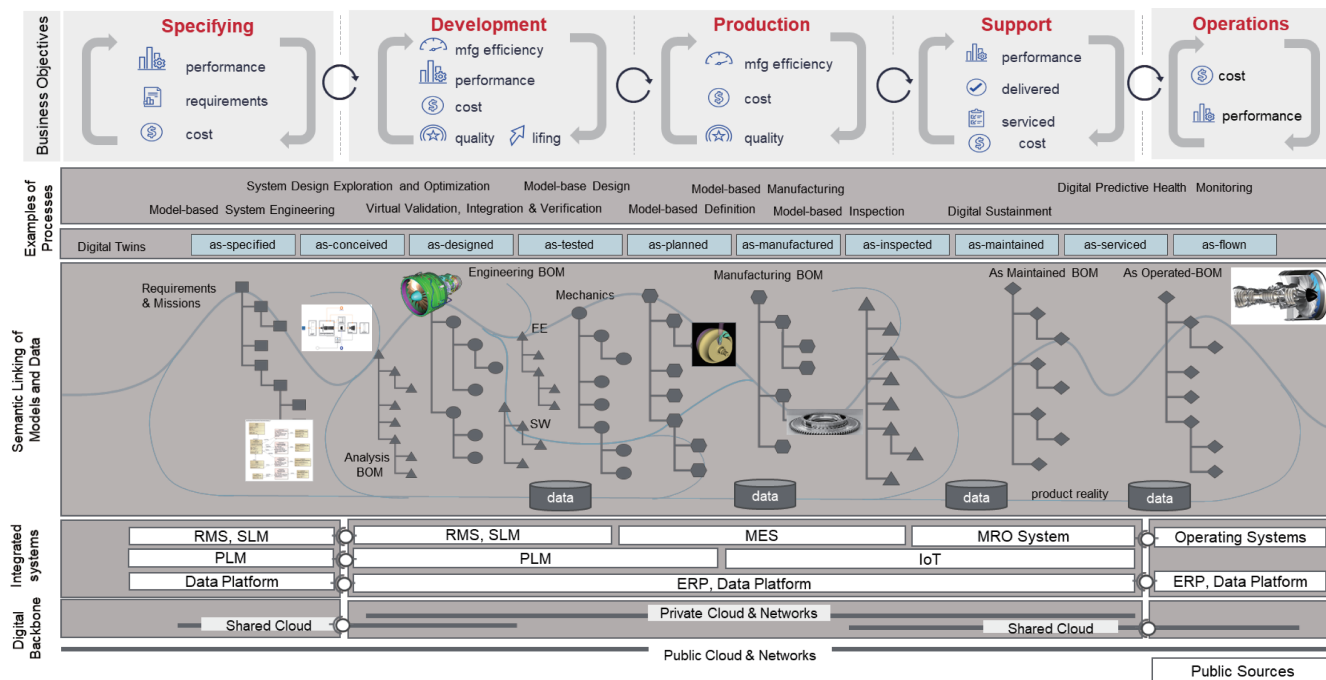


图 2 通用公司用于设计研发的数字主线

Fig.2 GE digital thread for design and development

图3 普惠公司航空发动机数字化平台架构^[15]Fig.3 Pratt & Whitney aero-engine digital platform architecture^[15]

using simulation capability enabling next design optimisation) 和后续多个计划,其中航空发动机作为其最重要的子系统开展了大量工作。赛峰(Safran)建立起一套面向行为式数字化样机(Behavioral digital engine)技术,实现从初步设计到详细验证和验收全生命周期的设计-分析一体化平台,对异构环境数据共享和交换行为的规范以及多信息系统的集成应用进行开发,对设计过程中每个设计环节的输入输出及方法实现追溯和审计,从而建立起基于仿真驱动设计的协同能力^[2]。

俄罗斯联合发动机公司(UEC)一直致力于制定基于数字孪生技术的发动机生命周期管理战略,为使用数字孪生作为主要工具奠定基础,通过需求管理系统确认在开发阶段实现产品的目标参数。在联合发动机公司的TV7-117ST发动机、礼炮公司的AI222-25发动机、土星公司的船用燃气轮机上实施了试点项目。土星公司已经开发了产品需求管理模块,对船用燃机要素进行了大量高精度

数学建模,创建了整机动态模型,并开发了用于预测运行状态和故障趋势发展相关程序,如图4所示^[19]。

航空航天和国防产品生命周期管理行动组(AD PAG)是由空客、波音、巴西航空、通用、湾流、三菱支线、普惠、罗·罗和赛峰等组成的航空航天原始设备制造商和飞机发动机供应商的协会组织,识别和描述当前MBSE标准和工具在支持行业数据交换方面的能力,讨论数字化业务体系结构和方法、标准的比较分析、战略和路线图,探索多视图BOM和基于3D模型的定义等具体的实施措施。该团队主要的业务挑战之一是数字化工具和基于模型的流程,通过技术数据包的双向交换,实现航空行业协作。目前,由成员公司领域专家组成的项目团队已经成立,以评估当前的数据互操作性标准,首先实现基于模型的系统工程(MBSE)概念设计过程,评估在协作产品开发活动中交换数字需求和系统架构模型。

中国航发运营管理系统(AEOS)及产品研发、生产制造、供应商管理

和服务保障4个体系建设的全面启动,在2022年形成一整套覆盖产品全生命周期的业务流程和管理规范,形成体系架构和实践方法论,强化协同,完成整个体系的数字化运行,推动业务向数字化、网络化和智能化运行。目前,国内航空发动机行业已经初步形成IPT团队组织模式、以需求为牵引的研制规划、基于产品数据中心的协同研发与管控,完成了基于文档的系统工程建设。与此同时,中国航发从论证开始逐步推进MBSE、数字主线、数字孪生等更先进的数字化发展方向,各发动机研究所成立系统工程部专门推进。

3 挑战及需求

数字发动机研究希望建设先进的、满足型号研制任务的、可应用于产品研发生命周期过程的产品数字化平台,从根本上改变传统的产品研发模式,从而大幅度提高产品质量,降低成本,缩短周期,须满足以下需求。

(1) 建设高可信度基础模型库

图4 UEC公司航空发动机数字孪生平台架构^[19]Fig.4 UEC aero-engine digital twin platform architecture^[19]

和算法库。

新的数字化转型是建立在原有成熟的正向研发体系之上,是对原有体系的继承和进一步发展,是设计体系成熟的结果,我国需要梳理航空发动机基础科研成果和型号设计开发经验,建立航空发动机知识体系和知识应用机制,开发统一管理、访问、处理的知识体系平台环境;建设系统全面的、规范化的、具有独立知识产权的先进航空发动机仿真分析体系,开发面向工程设计需求集成基础数据、计算工具、验证方法为一体的专业模型库和算法库;建设校核、验证与确认的标准化模型准入体系,形成模型可信度评估工作流程和规范,全面评估各阶段的建模工作和成果有效性。

(2) 建设即插即用互联互通的通用仿真平台。

数字化的所有成果都要集成在开发、运行和表达的平台中,即插即用互联互通平台是基础。构建满足航空发动机专业模块开发和验证所需要的通用仿真平台,能够进行模块的开发和部署,支持多种开发语言和开发框架,提供弹性扩展的、高可靠

的、容器化的程序运行环境;提供开放的数据接口,能够对接不同的第三方应用,可成为产品全生命周期开发平台的子平台;对于航空发动机专用场景,提供可视化开发套件,支持代码和不同功能模块的快速复用,提供模块的API接口开放,能够针对不同应用场景,快速组装并形成专业模块;提供数据处理 workflow,支持对不同应用场景下数据处理的灵活支持;提供强大的数据存储和管理能力,包括结构化数据库和非结构化数据库,还要支持文件存储和对象存储,以及时间序列数据库等;提供基于实时数据流的运行环境,能够支持基于数据的模型构建的工具和算法在平台运行,支持快速定制数据分析结果的可视化,支持根据实时数据实现诊断、评估和预测;能够提供包括身份管理、权限管理、知识产权管理等在内的管理模块,平台本身的功能模块、专业模块、可视化模块均形成标准化集成方法和规范,可实现建模和仿真协同;通过统一的业务流程整合工具,提供业务流程的统一建模和监控,在此基础上进行流程的管理和优化;能够整合MBSE和数字主线

相关工具和数据,形成符合数字化发展趋势的面向语义和连通性的革新平台。数字发动机平台的总体架构如图5所示,其包含平台基础建设和航空发动机模型库、数据库、工具库和知识库开发等几部分内容(简称“四库一平”)。

(3) 基于数字主线的仿真 workflow 管理和数据处理技术。

形成面向需求和系统模型的结构化、形式化的描述系统,基于系统模型完成不同阶段产品信息的表达,在整个生命周期中对系统设计与产品开发进行持续的验证与确认;高校、研究单位和行业通力合作,形成航空发动机需求和系统建模的规范,突破不同工具的数据交换及互操作性标准,建设面向不同发动机的系统模型用例和标准化数据库;打通系统建模工具、需求管理工具和联合仿真框架之间的业务链条,实现系统模型作为唯一真相源的通用化平台架构,可作为数字主线的一部分连接端到端的数据流。定义数字主线相关模型创建、信息传递、数据更新等标准或规范,集成数字主线工具链,保证全生命周期数据准入和传递质

量,实现数据流的有效通信;完善过程数据(仿真数据、试验数据等)管理能力、数据分析和异构数据集成能力,实现以系统模型为真相源的多源数据融合;发展新的流程自动化方法,发展接口和CAD-CAE自动化、网格自动化工具,关注智能识别、行为决策和过程控制相关数字化技术,实现产品技术状态的追溯和快速迭代更新。

(4)发展多学科耦合整机集成仿真技术。

面向航空发动机设计需求,建设多层次(部件或整机级等)和多学科集成仿真平台,打通多学科工具链,发展多物理现象耦合高效算法,发展面向整机和部件系统级的混维仿真方法。发展高效设计空间探索和性能改进方法和工具,形成面向设计需求的多学科集成优化工具;发展和验证流程紧密耦合的集成验证平台,开发面向功能和行为、不同抽象级别的高置信度降维仿真算法和基于数

据的快速仿真方法,发展全数字、半物理和虚实耦合试验验证体系。

(5)发展基于数据的分析和决策支持技术。

建设数据存储、管理方法并搭建平台,定义航空发动机异构数据处理规则和标准,发展大规模数据自动化数据处理、标记、管理工具,发展基于规则和模型的自动化数据转换与映射工具;发展高维仿真的人工智能降阶算法,发展基于数据的智能算法、仿真分析方法,发展机理和数据融合建模、仿真分析方法,发展智能识别和决策支持方法;发展数据可视化的交互工具,对数据、算法模型进行可视化展示,支持人工决策和表达。

4 关键技术问题

4.1 学科仿真模型集成

利用基于物理的分析能力,将相关学科模型进行集成,以便获得系统级功能和行为的方法,已经被广泛航空从业者认可。集成技术经过多年

的发展,学科模型也已经从单一工具的集成阶段,发展到协同环境下跨工具的集成阶段。无论处在何种阶段,学科模型之间的信息交互始终是集成的关键问题。学科模型的信息交互,主要包括学科知识之间的交互、异构数据模型的交互、模型间的信息通讯等。对于航空发动机此类学科复杂度高、耦合性强的专业,如何使学科模型高效集成、重用和优化,始终是研究的重要方向。

为了提升厂商的学科模型最终集成和验收测试能力,及时发现学科模型中的缺陷,减少由于学科之间语义差异引起知识交互误解的概率,提升多学科模型之间有效传递的知识与信息,德国航空航天中心(DLR)于2005年便开始开发允许任意数量的跨学科分析能力有效互联的技术——中心数据模型CPACS(Common parametric aircraft configuration scheme),该数据模型面向整个航空行业,利用通用的参

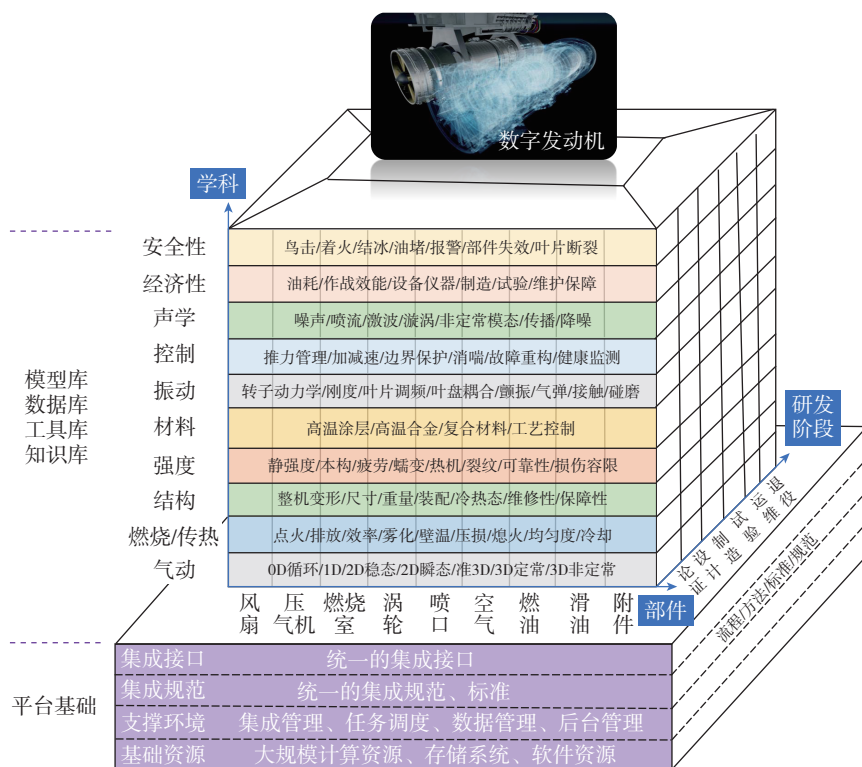


图5 数字发动机仿真平台总体架构

Fig.5 Overall architecture of digital engine simulation platform

数字化技术对飞机构型方案进行高保真度的描述,如图6所示^[20]。在已有CPACS及其关联工具发展的基础上,为了促进参数化飞机构型方案(CPACS)在发动机、空气动力学等专业与学科的应用,降低非标准化方式进行构型方案数据交换的不一致风险,促进跨学科知识与模型的集成和重用,Alder等^[21]开发了CPACSLibrary的软件库。软件库通过C++等基础编程语言完成了方法学的实现、测试驱动的开发、版本的控制、Python的绑定以及数据可视化的策略等功能,进而加速CPACS生态的完善。

除了CPACS此类面向行业的通用语言的研究与发展,在直接面向学科模型知识与信息传递方面,Sirin等^[22]提出了模型识别卡(Model identity card: MIC)的方法,通过对产品知识及学科模型的抽象形成标准化术语,实现模型不同性质的陈述,提升学科模型集成的可靠性。

为了简化不同学科仿真系统动态模型的创建、存储、交换和重用,用于模型/软件/硬件在环仿真、信息物理系统和其他应用,由戴姆勒

股份公司发起,在众多工业软件厂商、生产厂商及Modelica协会的共同努力下,形成了一套学科交互接口标准——FMI(Functional mock-up interface)。FMI^[23]是一个工具无关的标准,支持使用XML文件和C代码(或者在DLL/共享库中编译,或者在源代码中编译)的组合进行模型交换和动态模型的联合仿真。

在各类学科模型集成技术的不断发展中,航空业由于其工程的高度复杂性,使跨工程师、跨部门和跨厂商能够实现协同研发的需求愈发明显与紧迫。与之相应的,是不同来源的、不同质量的多学科模型协同开发的需求也亟须解决。由此,学科模型的集成也就逐步进入了协同环境下跨工具的集成阶段。在此种条件下,学科模型的集成除了面临学科本身的问题,还需要面对学科工作流程的定义,工作职责的划分,数据的存储、追溯、处理,学科模型的知识产权安全性等问题。为了缓解这些问题,欧盟通过资助的AGILE项目,提出了RCE(远程组件环境)工具^[24]——由德国航空航天中心(DLR)开发的开源应用程序。用户能够直观地集成学科工具,通过图形界面定义它们之间的依赖关系,并执行由此产生的多学科工程 workflow。产生的所有数据都集中存储,用于溯源、后续分析和后处理。在一定程度上,RCE使协作工程师可以很容易地将各自的学科工具贡献给多学科设计或分析,简化了 workflow 结果的分析。除了RCE,国内外还形成了众多跨工具的协同工作环境,如中船重工奥蓝托的iDesigner平台、索为公司的SYSWARE平台等,该类平台均以图形化的学科模型集成为基础,融入了行业研发经验,形成了学科模型集成平台化、协同化、跨工具化和跨地域化的趋势。

4.2 系统模型和学科模型的连通

系统模型可以被视为系统功能元素的战略组织,其布局使元素之间

的角色、关系、依赖关系和接口能够被明确定义和理解^[25]。目前,系统模型主要通过UML和SysML等系统建模语言以语义建模的形式,从全局视角描述产品的组成与关联关系,并不包含产品的全部详细定量信息,对于产品而言仍存在一定的不确定性,限制了系统模型对产品的预测能力^[26]。为克服系统模型的不确定性问题,在系统建模过程中引入学科模型,利用定量的学科描述提升系统模型决策和预测的有效性,已经成为普遍认可的解决思路。系统模型中融入学科模型,除了提高自身模型的能力以外,还可为学科模型提供管理媒介^[27],从跨学科关系的视角来驱动或引导学科模型之间的集成与优化,为航空发动机此类学科复杂度高、耦合性强的产品提供新的学科模型集成思路。

要实现系统模型和学科模型的联合应用,模型之间信息的连通性是必须解决的关键问题。由于系统模型的语义不确定性与学科模型的描述精准性差异明显,除了要明确交互接口规范、数据类型和通讯规则等信息以外,还需要精心设计并定义各自模型中信息交互与存储的属性。

当前,对于系统模型与学科仿真模型的连通研究,很多借鉴了学科模型之间集成的思路,如Galissou等^[28]使用Arcadia方法论,利用Capella工具创建产品系统模型的过程中,借助模型识别卡(MIC)的方法,在系统模型中引入新的Viewpoint配置用于捕获学科仿真的需求与特征,最终形成面向学科建模与评估的MIC,实现系统模型与学科模型的交互。

对于仍以文档管理为中心的学科几何模型,已有很多团队开展研究,力图用系统模型来驱动和管理几何模型,提升查询和分析系统模型与学科几何模型的能力。Bajaj等^[29]在系统建模过程中,以参数化建模的方式将几何模型与需求相关联,将需

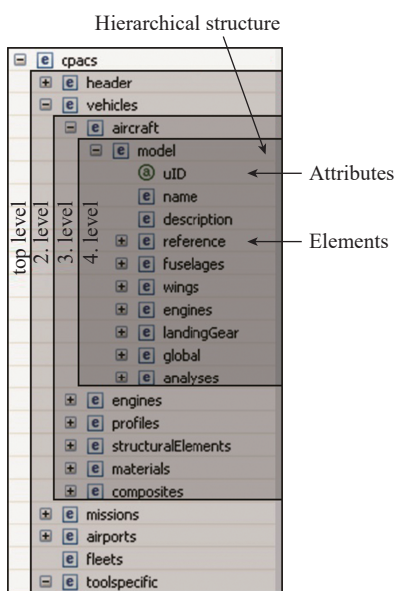


图6 CPACS结构图^[20]

Fig.6 CPACS structure diagram^[20]

求作为“种子”成为学科几何模型的起点,将系统级约束编码为几何或参数边界,在将系统需求可视化几何图形的同时,也实现了动态计算几何模型是否违反约束的方法。此外,通过对学科几何模型不同阶段基线模型内系统属性的提取,又实现了工程分析和系统需求的自动化验证。经过在数字主线方向一系列的研究与应用,Bajaj等^[30]的思想已经在美国Intercax公司推出的Syndeia平台中形成了系统生命周期处理程序(SLH)的软件环境,通过连接从需求和系统架构到PLM/计算机辅助设计、制造和仿真模型到机器人和传感器数据流的异构工件,提供构建、管理、查询和可视化数字主线的服务。Syndeia利用STEP、REST/HTTP、OSLC等开放标准,将源自各种软件仓库和工具的模型和数据结合起来,如SysML工具、PLM和ALM环境、数据库、需求和项目管理系统、数据库和仿真工具等,并为各个仓库、工具、模型和数据等编制产品/系统的总系统模型图提供可视化服务,在保证信息关联性、追溯性、交互通畅性的同时,最大限度降低工程师的学习与使用成本。

Vosgien等^[2]通过对学科几何模型的深入研究,引入了多学科数字集成链的概念,多学科数字集成链是多级设计-仿真回路,将子系统模型和数据(潜在来自多个学科)集成在一起,以预测全局系统行为,从而验证系统性能是否符合预期。在数字化集成链的背景下,提出了可用作大型装配有限元模型的数字样机转换方法,使系统模型可应用于学科几何模型的行为仿真中。

在现有研究的基础上,欧洲资助的AGILE 4.0项目也将目光聚焦在了系统模型与学科模型集成上,希望可以在实现系统方案权衡和需求追溯的同时,加速系统模型与学科模型之间相互转化的效率^[31]。通过研究与实践,形成了一个联合MBSE和

MDAO的开发框架^[32]。在此框架下,整合了一系列系统模型开发与验证工具、学科模型开发与分析工具和用于支持系统模型与学科模型转换的数据规范等成果^[33],并在某型无人机认证^[34]和某型号大飞机供应链管理^[35]等方面开展应用。

4.3 数字孪生的仿真建模方法

产品生命周期中的多个阶段向数字主线提供信息,可以用来在未来的设计中做出明智的选择,以及减少设计参数和工艺成本的不确定性。此外,这些信息可能揭示更有效的操作策略。执行设计决策为产品生命周期添加了新的信息,改变了数字主线的状态。这一过程可以用数据驱动的设计方法和不确定性下的决策问题进行数学描述。如利用贝叶斯推理和决策理论的工具,对其进行数学描述^[36]。

针对航空发动机数字孪生建模问题,早期主要有机理性建模、数据驱动建模,以及机理/数据混合模型3类方法。机理性建模方法从航空发动机的机理出发,基于通用理论模型,应用航空发动机循环的热力学公式对进气道、压气机、燃烧室、涡轮和尾喷管进行建模,考虑热力循环过程中的流量方程、压气机中的压缩方程、燃烧室中的热平衡方程、换热方程等建立航空发动机数字孪生模型。机理性建模的不足是缺乏与航空发动机实测数据的结合,因而难以准确描述和预测航空发动机全寿命周期性能特性。

近年来,随着数据驱动建模理论,包括支持向量回归建模、极限学习机建模、智能辨识优化算法以及机器学习等基本理论的发展,国外学者也发展了大量基于设备的运行数据,直接辨识/训练成高精度的数字孪生模型,例如通过NARMAX辨识方法可以在时域和频域分别对航空发动机进行分参数分析,确定模型阶数并对航空发动机进行建模,进一步提

高了建模方法的精确性。数据驱动建模目前主流是神经网络类方法,因此其强大的映射能力可实现多变量、强耦合、非线性的系统建模。数据驱动建模选取大量的样本数据,采用神经网络算法进行训练,可以得到更好的仿真效果,计算结果通常能够与实测数据精确吻合。数据驱动建模的不足是忽略了对设备物理特性的描述,难以对结果给出机理性的解释。

对于航空发动机数字孪生仿真建模来说,使用场景对其置信度要求极高时,单一的建模方法显然无法在全包线、全状态范围内精确反映航空发动机甚至飞机整体性能;另一方面,从整个数字孪生的高保真度要求来看,工业需求不仅追求发动机本身的热力性能信息,同时也关注其结构和内部三维流动,甚至全生命周期或各类故障下的表现情况,传统的单学科仿真难以满足数字孪生在航空发动机上的应用需求,多专业间匹配开始成为数字孪生的标配,因此其建模方法趋向多学科,跨专业,需要通过模型降阶技术、通用接口模型设计和统一仿真架构设计,将航空发动机气动、结构和系统等各类专业模型、有限元仿真模型进行有效集成,实现系统级的多学科联合仿真模型,涉及的建模技术包括:建模规范构建、多学科系统建模、有限元模型降阶、异构模型集成、模型修正与更新、虚实交互接口开发和模型实时化等技术。

5 结论

航空发动机产品的难度和复杂性迫切需要数字化技术的支持。对于欧美航空强国,数字发动机仿真技术已经在航空发动机的研制中起到关键作用,数据和模型连通性工作正在稳步推进,高精度数字化建模和动态仿真技术正在贯穿航空发动机研发和运维的全生命周期,并已经逐步整合到正向设计研发体系中,给发动机研制带来显著的效率提升和成本

下降。推动发动机装备由过去长周期试制向快速迭代转变,打造低成本可持续供给能力,构建航空发动机数字化生态是当务之急。

通过回顾数字化概念的发展历程和实质内容,本文指出了MBSE、数字孪生、数字主线等技术紧密且不可分割的关系,又认识到数字化面对的问题不是航空发动机独有的,而解决方案却一定是以行业特点和专家知识为主导,并结合数字工程概念发展了数字发动机概念。通过对国内外行业发展现状的分析,面对数字发动机挑战,总结出了建设高可信度基础模型库和算法库、即插即用互联互通的通用仿真平台、基于数字主线的仿真 workflow 管理和数据处理技术、多学科耦合整机集成仿真技术、基于数据的分析和决策支持技术等需要开展的工作内容。针对数字化需要建设的关键技术问题,本文总结学科仿真集成方法、系统模型和学科模型的连通方法、数字孪生建模方法的国内外相关研究内容和方向,为行业开展具体技术开发工作提供支持。

开展数字发动机研究和建设航空发动机全生命周期数字化协同平台,需要融合航空发动机设计技术、仿真技术和信息技术的最新成果,需要拥有颠覆性数字化、智能化理念和专精的航空发动机专业知识的研究机构、高校、研究所和生产厂家等单位的广泛和深入的合作。

参考文献

- [1] 曹建国. 航空发动机仿真技术研究现状、挑战和展望[J]. 推进技术, 2018, 39(5): 961-970.
- [2] VOSGIEN T, VAN T N, JANKOVIC M, et al. Towards model-based system engineering for simulation-based design in product data management systems[J]. IFIP Advances in Information & Communication Technology, 2012, 388(2): 612-622.
- [3] HERZIG S J I, QAMAR A, REICHWEIN A, et al. A conceptual framework for consistency management in model-based systems engineering[C]//31st Computers and Information in Engineering Conference. Washington, 2011.
- [4] ROPER W. Take the red pill: The new digital acquisition reality[R]. Washington: Department of the Air Force, 2020.
- [5] 关锋, 葛平, 周国栋, 等. MBSE 发展趋势与中国探月工程并行协同论证[J]. 空间科学学报, 2022, 42(2): 183-190.
- [6] GUAN Feng, GE Ping, ZHOU Guodong, et al. Development trend of MBSE and investigation of concurrent collaborative demonstration for chinese lunar exploration program[J]. Chinese Journal of Space Science, 2022, 42(2): 183-190.
- [7] CHE Y X. Application of MBSE in aero-engine structural parameter calculating system[C]//32nd Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences. Shanghai, 2020.
- [8] LIU Ting, ZHANG Jianchao. Preliminary discussion on application of digital thread to aero engine[J]. Aerospace Power Technology, 2021(2): 30-34.
- [9] LU J, CHEN D J, GÜRDÜR D, et al. An investigation of functionalities of future tool-chain for aerospace industry[J]. INCOSE International Symposium, 2017, 27(1): 1408-1422.
- [10] TAO F, ZHANG H, LIU A, et al. Digital twin in industry: State-of-the-art[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(4): 2405-2415.
- [11] XIE R, CHEN M, LIU W, et al. Digital twin technologies for turbomachinery in a life cycle perspective: A review[J]. Sustainability, 2021, 13(5): 2495.
- [12] 任祝寅, 周华, 张健, 等. 数字孪生在航空发动机燃烧室设计阶段的应用与展望[J]. 航空制造技术, 2022, 65(17): 34-39.
- [13] REN Zhuoyin, ZHOU Hua, ZHANG Jian, et al. Application and prospect of digital twin in design phase of aero-engine combustion chambers[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(17): 34-39.
- [14] NOGUCHI R A, WHEATON M J, MARTIN J N. Digital engineering strategy to enable enterprise systems engineering[J]. INCOSE International Symposium, 2020, 30(1): 1727-1741.
- [15] MOITRA A. Validation and verification for digital twins[R]. New York: GE Research, 2022.
- [16] ZOLOTAS A, HOYOS RODRIGUEZ H, HUTCHESON S, et al. Bridging proprietary modelling and open-source model management tools: the case of PTC integrity modeller and epsilon[J]. Software and Systems Modeling, 2020, 19(1): 17-38.
- [17] FERRARI A, NAGEL A. Connecting, tracing and managing the lifecycle of models, simulation and linked data: Is that easy[R]. Raytheon Technologies: 2020.
- [18] LO C K, CHEN C H, ZHONG R Y. A review of digital twin in product design and development[J]. Advanced Engineering Informatics, 2021, 48: 101297.
- [19] ZACCARIA V, STENFELT M, ASLANIDOU I, et al. Fleet monitoring and diagnostics framework based on digital twin of aero-engines[C]//American Society of Mechanical Engineers, 2018.
- [20] LACAILE J. Advances in condition monitoring and structural health monitoring[M]. Singapore: Springer Singapore, 2021.
- [21] SALNIKOV A V, GORDIN M V, SHMOTIN Y N, et al. Digital twins—a platform for aircraft engine lifecycle management[C]//Higher Educational Institutions Machine Building, April, 2022. <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2022-4-60-72>.
- [22] NAGEL B, BÖHNKE D, GOLLNICK V, et al. Communication in aircraft design: can we establish a common language[C]//28th International Congress of the Aeronautical Sciences. Brisbane, 2012.
- [23] ALDER M, SKOPNIK A. Development of a software library for performant and consistent CPACS data processing[C]//Deutscher Luftund Raumfahrtkongress 2022. Dresden: DGLR, 2022.
- [24] SIRIN G, PAREDIS C J J, YANNOU B, et al. A model identity card to support simulation model development process in a collaborative multidisciplinary design environment[J]. IEEE Systems Journal, 2015, 9(4): 1151-1162.
- [25] BLOCHWITZ T, OTTER M, ÅKESSON J, et al. Functional mockup interface 2.0: the standard for tool independent exchange of simulation models[C]//The 9th International MODELICA conference. Munich, 2012.
- [26] BODEN B, FLINK J, FÖRST N, et al. RCE: An integration environment for engineering and science[J]. SoftwareX, 2021, 15: 100759.

- [25] KAPURCH S J. NASA systems engineering handbook[M]. Pennsylvania: Diane Publishing, 2017.
- [26] NOWODZIENSKI P, NAVAS J. From model-based to model and simulation-based systems architectures-achieving quality engineering through descriptive and analytical models[J]. INCOSE International Symposium, 2022, 32(1): 1247–1266.
- [27] WATSON M D, MESMER B L, FARRINGTON P A. Engineering elegant systems: Theory of systems engineering[R]. Alabama: NASA, 2020.
- [28] GALISSON G, HAMMADI M, GHERIB M, et al. Model-based systems engineering methodology for defining multi-physics simulation models[C]//2022 IEEE International Systems Conference (SysCon). Montreal, 2022.
- [29] BAJAJ M, COLE B, ZWEMER D. Architecture to geometry-integrating system models with mechanical design[C]//Model-Based Systems Engineering: Methodologies and Tools I. California, 2016.
- [30] BAJAJ P M, HEDBERG Jr. T. System lifecycle handler—Spinning a digital thread for manufacturing[J]. INCOSE International Symposium, 2018, 28(1): 1636–1650.
- [31] CIAMPA P D, NAGEL B. Accelerating the development of complex systems in aeronautics via MBSE and MDAO: A roadmap to agility[C/OL]//AIAA Aviation 2021 Forum. Virtual Event: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2021. <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.2021-3056>.
- [32] BOGGERO L, LEFÈBVRE T, Vankan J, et al. The agile 4.0 MBSE-MDAO development framework: overview and assessment[C]//33rd ICAS Congress. Stockholm: ICAS, 2022.
- [33] CIAMPA P D, LA ROCCA G, NAGEL B. A MBSE approach to MDAO systems for the development of complex products[C]//AIAA Aviation 2020 Forum. Virtual Event: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2020. <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.2020-3150>.
- [34] TORRIGIANI F, DEINERT S, FIORITI M, et al. An MBSE certification-driven design of a UAV male configuration in the AGILE 4.0 design environment[C]//AIAA Aviation 2021 Forum. Virtual Event: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2021. <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.2021-3080>.
- [35] DONELLI G, CIAMPA P D, NAGEL B. A model-based approach to trade-space evaluation coupling design-manufacturing-supply chain in the early stages of aircraft development[C]//AIAA Aviation 2021 Forum. Virtual Event: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2021. <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.2021-3057>.
- [36] SINGH V, WILLCOX K. Engineering design with digital thread[J]. AIAA Journal, 2018, 56(11): 4515–4528.

Digital Engine Technology Status, Challenges and Key Issues

HU Zhongzhi, CAO Wenyu, HE Ai, WEI Jianwei, LIU Kai, YANG Jiali, XU Quanyong
(Institute for Aero Engine, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

[ABSTRACT] Aero-engine design and simulation technologies thrive in metasynthesis and integration. Meanwhile, with the improvement of system engineering methodology, the digital revolution in aero-engine field is in the ascendant. The concept, current situation, demand and key technical issues of aero-engine digitization are reviewed in the hope of providing reference and support for chinese aero-engine digital transformation. Facing the complex essence of aero-engine, the concept and connotation of model-based system engineering, digital twin and digital thread are analyzed, and the definition of digital engine is further developed. The use cases and development status of digital engine at home and abroad are summarized and the work needing to be done including model and algorithm library, general platform, data connectivity and processing, coupled and integrated simulation technologies, data analysis and decision making is discussed, according to the technical trends and challenges. Aiming at the key technical problems of digital transformation, the relevant research content and direction of the disciplinary simulation integration method, the communication method of system model and discipline model, and the digital twin modeling method are discussed. The idea and specific research content of digital engine can provide the foundation for subsequent planning and construction of aero-engine digital twin systems.

Keywords: Aero-engine; Digital engineering; Digital thread; Digital twin; Model-based system engineering

(责编 大漠)