

2023年航空动力领域数字化进展

Progress of Aero Engine Digital Transformation in 2023

■ 付玉 / 中国航空发动机研究院

在美国数字工程战略的引领下，航空发动机制造商纷纷在数字化领域进行积极探索。尽管GE公司的Predix平台并未达到预定目标，罗罗公司的R²实验室也因业务重心调整而关停，但航空发动机制造商的数字化进程并未止步，虽步履蹒跚，但始终前行。

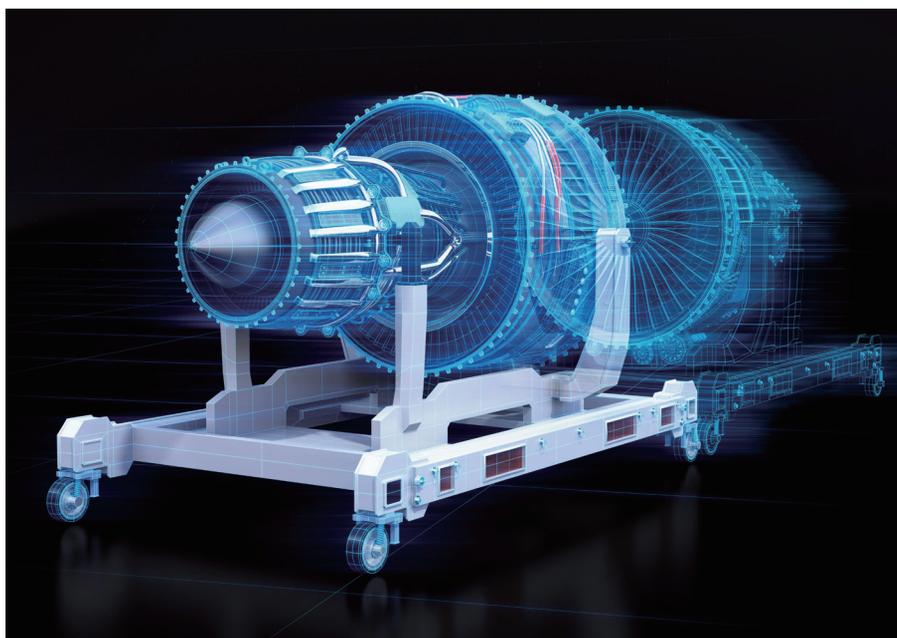
新 一轮科技革命和产业革命的深入推进，正不断重塑全球创新版图。数字化是第四次工业革命的核心技术之一，对各行各业都产生了深刻影响。作为尖端装备制造领域的从业者，航空发动机制造商纷纷在数字化领域积极布局，持续推进。2023年，航空发动机设计、制造、维修等阶段的数字化转型均取得了一定进展。

设计研发试验阶段：超算与仿真技术加速产品装备研发

传统的航空发动机设计按照“设计—验证—修改设计—试验验证”的模式反复迭代，具有周期长、耗费大、风险高的问题。为了满足对航空发动机日益增长的高性能与低成本的迫切需求，减少设计参数和工艺成本的不确定性，航空发动机的设计研发模式正在从传统的串行设计向以数字建模和高精度仿真为核心的预测设计转变。

GE公司借助超级计算机模拟RISE发动机架构

2023年6月，GE公司开发了能够在Frontier超级计算机上运行的计算流体力学（CFD）软件，模拟发



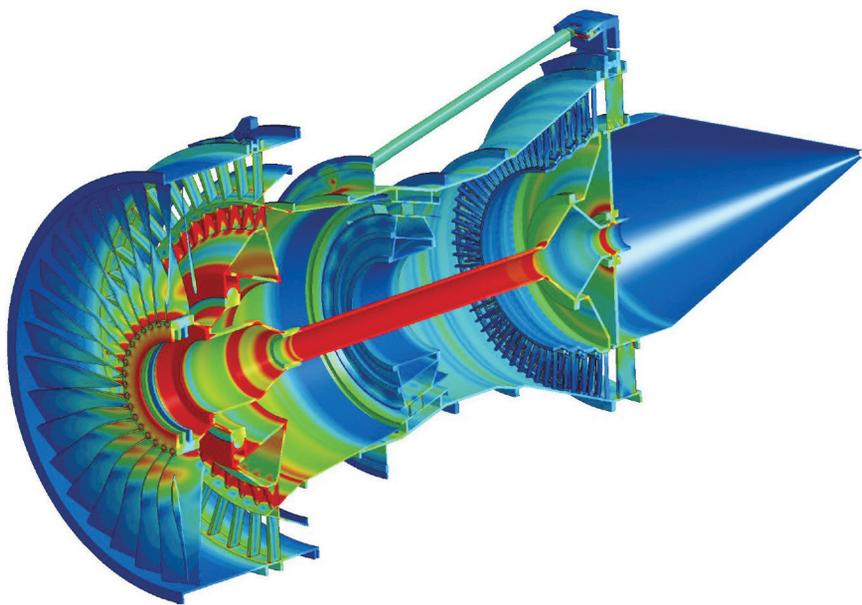
航空发动机数字孪生示意图

动机性能和噪声水平，以支持可持续发动机革命性验证（RISE）项目中开式转子发动机架构的设计开发。Frontier是美国能源部橡树岭国家实验室的超级计算机，数据处理速度超过每秒百亿亿次，是目前世界上速度最快的计算机。GE公司的CFD软件与Frontier相结合，可以模拟全尺寸开式转子的空气流动状态，在细节呈现方面实现了跨代提升。此外，超级计算机可以实现在设计阶段评估新发动机技术在飞行试验状

态下的性能，从而进一步改进试验件的设计，更好地优化发动机性能及其与机体的集成。

罗罗公司大幅缩短航空发动机研发仿真时间

2023年6月，罗罗公司与工程仿真软件供应商Ansys公司、英特尔公司开展合作，将发动机热机械模型的仿真时间从1000h缩短至10h以内，速度提高了100倍，节省了能源和开发成本。Ansys公司的仿真软件LS-DYNA采用了英特尔oneAPI数学



发动机热机械模型仿真示意图

内核库 (MKL), 降低了仿真所消耗的内存, 并将运行速度提高了几个数量级, 从而节省功耗和能耗。罗罗公司还利用数字孪生技术进行高保真设计并创建虚拟原型, 通过在整个开发过程中整合仿真和数字孪生的成果, 进而设计出更高效的推进系统。

UEC 舰用燃气轮机数字孪生开发工作即将完成

2023年10月, 俄罗斯联合发动机制造集团 (UEC) 旗下土星科研生产联合体宣布即将完成为期3年的舰用燃气轮机数字技术开发项目。项目共开发6款软件产品、380多个燃气轮机系统和单元的数学模型, 以及机械和热处理工艺流程的设计模型, 进行了2000余次虚拟测试。此外, 还开展了CML-Bench数字平台的开发工作, 创建了推进系统的基本元素建模、整机动态模型和运行状态预测程序, 并集成了数字孪生的数学模型。该项目是对俄罗斯国内发动机研发技术与信息技术的重要集

成, 可将工程计算时间缩短30% ~ 40%, 减少新产品研发的时间和成本, 并在使用阶段监控和预测燃气涡轮发动机技术状态。目前, 取得的软硬件成果已被用于改进舰用燃气轮机初步方案的开发过程。

生产制造阶段: 数字化方法应用与智慧工厂建设成效初显

生产制造过程中, 航空发动机制造商从标准制定出发, 积极引入智能化的方法和设备, 以搭建数字化车间平台为基础, 以数据的全过程采集和集中可视化管理与应用为核心, 对生产过程进行实时监测与评估, 积极推进设计、工艺、制造之间数据流贯通与共享, 力图实现上下游的高效率协同。

UEC 使用神经网络方法评估发动机零件质量

2023年4月, UEC推出新型质量控制方法, 借助机器视觉和神经网络技术, 通过先进图像处理算法,

实现发动机叶片质量评估过程的自动化。新方法可实现部件全表面成像、缺陷搜索、几何特征计算, 并根据监管文件判断产品是否合格。该方法可以检测所有类型的缺陷, 包括裂缝、孔洞等, 同时可在生产产品上留下“数字痕迹”来进行生产流程回顾分析, 以便进行优化, 在生产过程中提高检测结果的准确性和可靠性。

赛峰集团开发无损检测软件套件进行质量检查评估

2023年6月, 赛峰集团开发了SMV2软件套件, 用于LEAP发动机风扇叶片、发动机短舱内部固定结构面板、可收放起落架等产品的无损检测 (NDT), 进行金属和复合材料零件的质量检查和评估。该软件采用热成像、断层扫描、射线照相等方法进行数据采集, 能够有效地识别裂纹、孔隙、夹杂物、尺寸变化和其他潜在缺陷; 软件可集成到自动化设备执行多种功能, 与自动化设备通信, 以控制设备中内置的红外摄像机以及加热部件表面的闪光灯, 实现图像抓取; 还可以实时监控整个过程, 支持操作员分析图像以检测任何缺陷, 将信息存储在数据库中供数据专家或生产经理使用, 并自动生成用于验证零件的检验报告。

俄罗斯正在编写燃气涡轮发动机数字孪生国家标准

2023年8月, 俄罗斯中央航空发动机研究院 (CIAM) 与俄罗斯联邦原子能中心合作开展《燃气涡轮发动机和装置的数字孪生一般规定》国家标准的编写, 旨在开发一个在航空发动机和燃气轮机全生命周期各个阶段使用数字孪生技术的标准要求体系。该项工作在《计算机模



赛峰集团利用SMV2软件套件进行无损检测

型和建模产品的数字孪生一般规定》的基础上开展，后者是由俄罗斯制定的世界上首个发动机制造领域数字孪生的国家级标准文件。该标准于2022年在俄罗斯联邦生效，2023年11月列入中俄飞机工业互相认可标准。

UEC持续推进数字化生产设施建设与应用

2023年4月，UEC将超过1000台机床的现代化监控系统接入“礼炮”莫斯科机械制造厂的制造中心，集中式的数字监控系统使设备的利用率提升40%，停工时间减少12%。预计未来“地平线”机械制造设计局、“礼炮”沃斯克列先斯基机器制造厂、鄂木斯克发动机制造联合体等都将引入该系统。

2023年5月，土星科研生产联合体完成了“智慧工厂”数字平台综合实施项目第四阶段的工作，实现了试点运行。平台以大数据、工业互联网和工业设备监控系统为基础，可以在生产链的各个阶段对业

务流程进行端到端控制。目前，包括发动机叶片生产等23个车间已连入信息系统，平台能够根据相关数据自动生成管理指标，并进行实时分析，以做出最有效的管理决策。项目最终将建立一个统一的信息空间，完成设计制造和管理的数字化，

实现产品全生命周期跟踪。

维修保障阶段：发动机健康管理系统升级加速

以发动机健康管理系统为核心的在线状态监测、故障诊断与寿命预测，是先进航空发动机及燃气轮机安全运行和经济可承受的关键支撑，也是提升智能化水平的关键步骤。随着智能化方法的应用和计算能力的增强，发动机健康管理系统的性能正不断增强，加速发动机预防性维护进程，助力航空发动机向自诊断、自预测、自我管理方向发展。

GE公司通过数字孪生技术增强燃气轮机预警能力

2023年2月，GE公司与Cochin Shipyard公司签订合同，为LM2500舰用燃气轮机提供全面的数字解决方案包以增强其能力，该燃气轮机为印度海军的维克兰特（Vikrant）号航空母舰提供动力。数字解决方案包中包含了GE公司的SmartSignal



俄罗斯数字平台应用示意图

解决方案，将其置于航空母舰的数字孪生体中，可以为印度海军提供可能导致燃气轮机损坏的早期警示，实现预测性操控模式，提高效率、降低作战风险。

GE公司推出CT7-8发动机健康监测工具改进计划

2023年3月，GE公司和PHI航空公司宣布将启动CT7-8发动机健康监测工具试点计划，对该工具进行改进和扩展，使其更好地满足CT7系列发动机的健康管理需求，为主动维护奠定基础。GE公司将其专业知识和经验与发动机健康监测工具相结合，通过自动化的分析过程以确定主动维护需求，提供定制化的维护建议，能够提高发动机的性能和可靠性，进一步降低运营成本。

普惠公司推出发动机智能检测工具以降低发动机租赁成本

2023年6月，普惠公司宣布与印度一家计算机视觉和人工智能(AI)初创公司Awiros合作推出先进的发动机智能分析工具。该工具是一款针对齿轮传动涡扇(GTF)、

V2500等商用发动机的计算机视觉产品，可以在不用任何专用硬件的情况下，用手机对发动机进行高保真扫描以获取发动机的图像和视频，并允许用户在云交互界面上即时获得零部件可用性的反馈，实现发动机检测自动化，无需检验员逐个检查发动机零部件，使检测时间缩短了近90%，有助于更快速、更低成本地租赁发动机。

下一代FADEC系统正在追求更强的数字化能力

目前，全权限数字式电子控制(FADEC)系统供应商正在通过提升产品数字化能力提高发动机的运营和维护效率。柯林斯宇航公司对其FADEC系统产品组合进行了重大投资和改进，采取包括增加微电子技术、先进制造技术和复杂封装解决方案的使用等措施，以适应苛刻的温度和振动环境；霍尼韦尔公司已经在FADEC系统中建立了更高的计算能力，实现了超快速计算和精确的控制，降低了耗油率，提升了诊断/预测能力，并增强了发动机与其

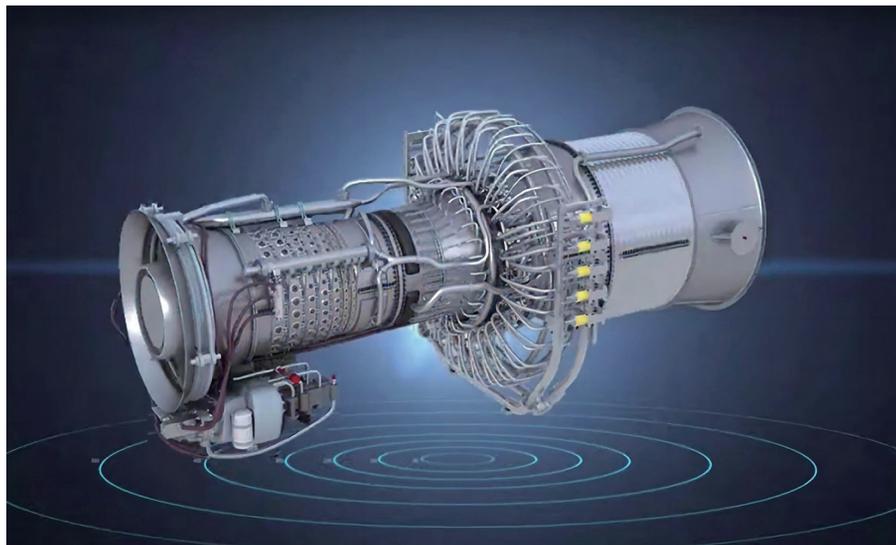
他飞机系统高速数据通信性能；赛峰集团正在致力于RISE开式转子发动机FADEC系统的研发。RISE发动机所需的计算能力是其目前最新产品FADEC4系统能力的5倍，并需要引进多核处理器、分布式架构、主动热控制和高级振动处理等多项新技术。赛峰集团已经组建了技术工程团队进行攻关，并将在RISE项目验证过程中对新功能进行集成。

结束语

新一轮工业革命是历史给予企业乃至行业的一次难得的机遇与挑战，高性能、高可靠性、高经济可承受性等也对航空发动机的发展也提出了越来越高的要求。航空发动机巨头的数字化转型，承载着强化自身增长动能、引领新一轮科技革命和产业变革浪潮的双重使命，已经成为航空发动机企业发展的关键战略和必然举措。2023年，GE公司、罗罗公司借助合作伙伴的计算与仿真能力，进一步缩短了产品装备的研发时间；赛峰集团专注于自身对软件的开发集成，促进了生产过程自动化与效率提升；普惠公司持续深耕产品的维护保养，推动智能工具的开发与使用以提升产品的经济性；UEC则继续聚焦数字孪生技术和数字化车间平台搭建，力图实现数据流的贯通，最大化实现资源合理调配。尽管有一些质疑的声音出现，但数字化技术仍是在系统工程的基础上提升航空发动机全生命周期效率的最优措施，在可预见的未来仍将持续推进。

航空动力

(付玉，中国航空发动机研究院，工程师，主要从事航空发动机科技情报研究)



GE公司燃气轮机数字解决方案示意图