

2024年航空发动机领域数字化进展

Progress of Aero Engine Digital Transformation in 2024

■ 付玉 / 中国航空发动机研究院

以人工智能为代表的综合性数字化技术正在与航空发动机全生命周期进行融合，航空发动机传统能力升级模式得到改变，“人工智能+”创新实践路径正在逐步解锁。

航空发动机制造商在2024年以数字化能力建设为突破口和核心主线，理论上积极探索，方法上不断创新，加速将知识经验与技能转化为与新兴技术能力相融合的数字化模型，使综合仿真支撑能力不断升级，生产制造精益程度不断提高，高精度个性化的预测维修与运营策略不断推广，航空发动机领域数字化转型进程正在加速。

设计研发测试阶段：高速化、综合化

航空发动机制造商以超算设备与高性能仿真计算技术加速发展为契机，大力推动大数据、人工智能（AI）等新一代数字化技术与建模仿真理论方法融合，进一步提升和释放航空发动机建模仿真能力，支撑数字孪生等复杂高精度仿真技术应用，有力推动了设计研发进程，助力航空发动机性能进一步提升。

超算技术在航空发动机领域应用得到进一步推广

2024年3月，俄罗斯宣布推出新型超级计算机，每秒可执行219万亿次运算，将用于创建航空发动机数字孪生体。新的高性能计算系统大幅改善了俄罗斯航空发动机制



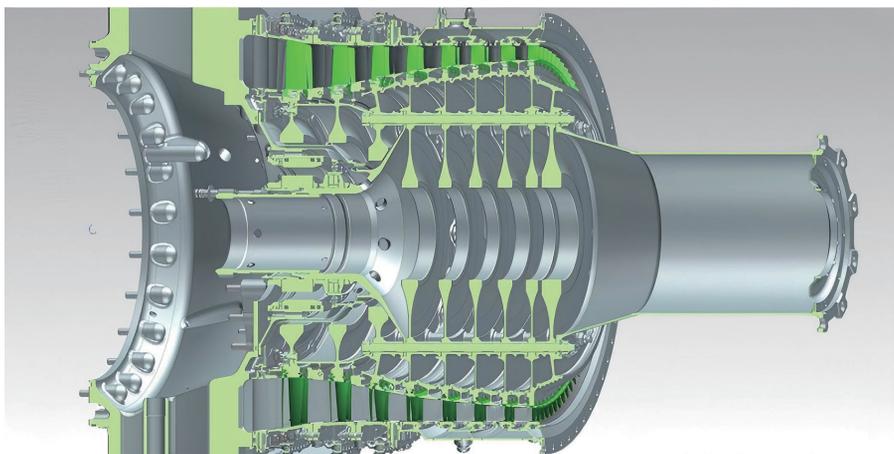
UEC使用计算机模拟PD-8发动机台架试车

造集团（UEC）的计算资源，缩短了计算时间，提高了计算机建模的精度，使仿真结果接近全尺寸试验。2024年7月，GE航空航天公司与美国能源部橡树岭国家实验室达成1项新的合作研究与开发协议，利用超级计算机Frontier推进开式转子发动机的开发。为了模拟全尺寸开式转子发动机设计的空气动力学和声学性能，GE航空航天公司研发了能够在Frontier上运行的计算流体力学（CFD）软件，能够更有效地提取信息，并结合前沿AI工具来提高对结果的理解，简化物理可视化流程。此外，GE航空航天公司宣布将于2025年利用Frontier和Aurora超级计算机来模拟可持续发动机革命性验证（RISE）计划下的开式转子发动机与飞机的集成。这2台计算机位于美国能源部资助的国家实验室，该

部门将为RISE计划提供84万“节点小时”的计算资源支持，以提升开式转子发动机在安装配置中的性能表现，以降低实际应用中的风险。

俄罗斯利用数字孪生技术加快发动机认证进程，并完成数字孪生系统开发

2024年5月，UEC“留里卡-土星”科研生产联合体宣布引入数字认证概念，新发动机可以首先借助数字孪生和虚拟试验进行试车，进行必要的调整之后再行实物试验，认证文件可以包含计算机模拟结果。数字试验可以对动力装置的单个组件和整个系统进行虚拟测试，用于验证发动机的冷却性能、在恶劣天气条件下以及鸟撞等落入异物条件下的性能，还包括是否满足消防安全要求等，将大大减少新型号研发时的台架试车量，显著提高PD-8等



UEC 数字孪生系统示意图

发动机的认证效率。2024年6月，UEC宣布完成AI-222-25发动机数字孪生系统开发，该项目已经将数千个部件数字化，建立并完善了组件的气动模型，确定了模型之间的数据传输结构和格式，开发了能够改进发动机核心机热力学、流体力学和气动等性能的复杂计算模型，还开发并应用了自动计算链，对所有节点的工作进行了数字建模和分析，用于跟踪发动机设计更改时的技术参数变化。目前，该数字孪生系统已用于评估使用过程变化对发动机设计状态的影响。

俄罗斯加大仿真理论研究力度 以减少发动机现场测试次数

2024年6月，UEC“礼炮”莫斯科机械制造厂与莫斯科国立大学共同开发了压气机叶片自振模型，首次实现在设计阶段检测和调整压气机转子叶片颤振。该研究团队在此基础上设计了一个能够自动进行数学计算的软件，并被批准用于发动机的开发，可通过减少测试量获得显著的经济效益。目前，UEC已经使用该方法对发动机低压压气机第一级转子叶片的自振进行了调试，

发动机的可靠性有所提升。

生产制造阶段：精益化、集成化

增材制造、增强现实等技术成为航空发动机制造商战略布局重点，并取得一定成效，实现航空发动机制造质量与效率的提升。同时，多种智能制造技术集成形成的数字化工厂建设逐步完善，打破了传统设备间的信息孤岛，使数据在工厂设备间能够自由流动与高效共享，从而实现根据实时生产需

求对设备资源进行智能调度和系统优化，减少冗余环节，使生产过程更加流畅，逐步实现精益生产。

增材制造能力得到发展，逐步走向实用

2024年1月，吉凯恩（GKN）公司投资5000万英镑用于增材制造领域的厂房建设、机械设备升级，以及相关技术产品开发。GKN公司在2023年年底开始为普惠公司PW1500G发动机批量3D打印风扇机匣安装环。相比传统的减材制造，3D打印能将每个部件所需的原材料减少72%，CO₂排放量减少6.5t。2024年3月，美国普渡大学研究团队使用增材制造技术制造出全尺寸、可操作的超燃冲压发动机原型机，飞行速度超过马赫数（Ma）5，高效、快速、低成本地实现了原型机制造过程。2024年7月，普惠公司在TJ150发动机的重新设计过程中，通过增材制造技术将部件总数从50多个减少到几个，减轻了发动机质量，加快了组装过程，提高了质量控制效率，并简化了供应链。普惠公司在F135发动机



吉凯恩公司生产的大型飞机发动机部件

和TF33发动机等多个型号中均尝试使用增材制造技术，预计仅在铸件和模具方面能节省约10亿美元。

俄罗斯将增强现实技术用于发动机装配

2024年4月，UEC在航空发动机部件装配流程中引入了增强现实技术试点项目，该项目方案通过增强现实眼镜和其他类型移动设备的结合来实现。增强现实眼镜镜面上按步骤显示说明书，航空发动机装配工人佩戴增强现实眼镜进行操作，通过软件平台装配人员可以对所进行的操作进行拍照和视频记录，构建装配过程的数字轨迹，并自动形成产品装配卡所有必要的信息。此外，该系统还能记录每个工序的时间，跟踪员工的工作量，并分析每个待出厂产品的工作性能。如有必要，还可以直接在工作现场联系专家进行咨询。该项目提高了员工的操作速度，加快了装配进程，优化了生产流程，提高了产品质量，有效提升了航空发动机企业产能。

罗罗公司数字化工厂推动欧洲未来作战航空系统项目创新

2024年10月，罗罗公司宣布其作为欧洲未来作战航空系统研发单位之一的未来工厂（Future Works）正在从传统生产方法向前沿数字环境转变，以实现简化生产流程、降低成本，旨在实现“无纸化工厂”目标。举措之一是采用增材制造技术在现场快速生产定制工具，从而显著减少采购工具相关的成本和时间；该工厂还在研究采用增材制造技术进行现场废料的回收再利用，以满足可持续生产和反复试验等需求。此外，数字化解决方案正逐步嵌入到该工厂的所有生产线中。未来



罗罗公司对航空工程师进行虚拟现实技术培训

工厂使用SMART工具及控制系统取代传统的纸质系统，能够实时跟踪设备和流程，提高效率。同时，虚拟现实、增强现实等创新解决方案的应用，使工程师和设计人员更有效地协作，在设计流程的早期发现问题，改善整个供应链的沟通，降低制造过程中出现错误和延迟的风险。未来，该工厂还将利用数字孪生、制造执行系统（MES）等数字技术，推动航空航天制造领域的数字化创新发展。

维修保障运营阶段：自诊断、自我管理

机器学习算法与传感器结合形成的智能设备在航空发动机维修保障阶段应用范围扩大，逐步从试点验证向规模化应用迈进，促进了航空发动机故障动态感知与实时分析能力的提升，助力航空发动机实现故障预测预警和维修策略的自主决策；同时，大数据、AI等技术与企业运营相融合，进一步促进了新思想、新理念的迸发，使运营计划的制订与调整更加科学，实现对市场变化的快速响应。

AI技术推动航空发动机预测维修进程加速发展

2024年1月，“留里卡-土星”科研生产联合体宣布引入机器人系统，实现零件质量预检查流程的自动化。该系统包括1个AI检测点平台，以及2个叶片检查机器人工作站。工作站配备了机器视觉照相机用于检查零件表面，并做出相应标记；平台使用机器视觉获取叶片上人眼难以观测到的最小缺陷影像，AI基于对各种不同类型影像的分析来识别缺陷，并对其进行处理。该联合体采用机器视觉和AI技术可以将燃气涡轮发动机叶片表面缺陷检测流程缩短一半。2024年5月，彼尔姆航空发动机公司宣布在航空发动机风扇叶片试验分析中使用了AI技术，采用智能视觉方法分析风扇转子叶片双锁结构元件的静强度试验和循环寿命试验结果。同时，将机器学习方法用于构建模型，以对运行中燃气涡轮发动机的组件状态进行预测性诊断，有效解决了复杂的设计、工艺和生产问题。2024年10月，GE航空航天公司

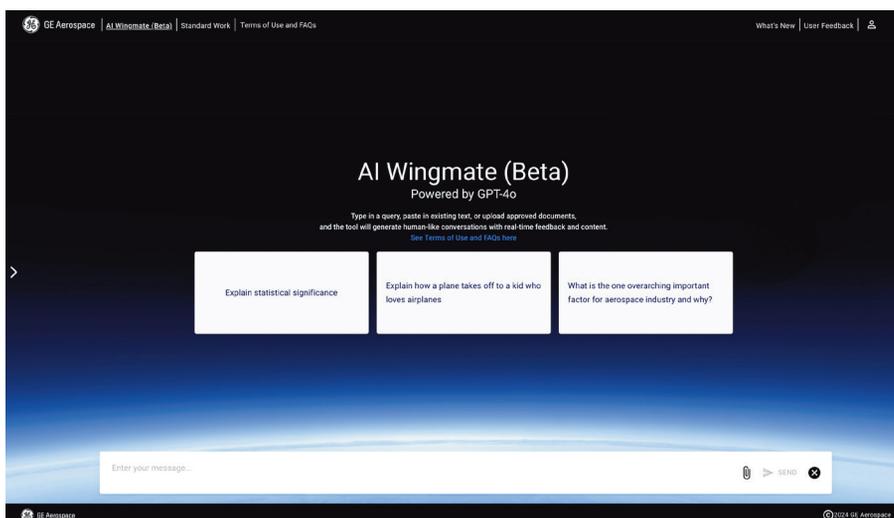
宣布将AI叶片检查工具（BIT）扩展应用于LEAP发动机和GE9X发动机，该工具已经成功应用于GENx发动机的第一级和第二级高压涡轮叶片，与传统的孔探检查相比，叶片检查时间从3h缩短到1.5h，减少了周转时间（TAT），最大限度地延长了发动机在翼和服役时间。

CFM国际公司通过机器学习提升LEAP发动机健康监测能力

2024年4月，CFM国际公司为运营商提供了迄今为止最精确的发动机运行数据模型。健康监测系统通过概率诊断技术和机器学习工具对起飞、爬升和巡航时的数据进行建模，然后根据已知的发动机运行特征提供有针对性的警报，生成的运行模型是CFM国际公司迄今为止构建的最准确的模型，能够在早期发现潜在问题。该健康监测系统和CFM国际公司全球机队支持团队的专业知识相结合，使CFM国际公司能提前60%的时间给出预测性维护建议，检测率提高了45%，并能够将错误警报的数量减少一半，为机队管理的高效决策做出了有力支持。

莫斯科航空学院研发发动机寿命评估的人工智能系统

2024年4月，莫斯科航空学院（MAI）与S7 Tech Lab航空公司合作开发发动机剩余寿命预测系统，该系统可以采集发动机传感器数据，并对采集的参数进行分析，包括气动特性和外部环境参数，如排气温度和耗油率等。分析时考虑的外部环境参数包括飞机周围的空气温度、飞行高度及发动机出口压力。此外，另一组参数还可以反映发动机重要部件的情况，如横向供油阀的位置。如果检测到阀门位置偏离正常位置，则表明供



GE 航空航天公司与微软公司合作开发的 AI Wingmate

油系统可能发生了故障，需要立即进行干预，以保证发动机正常工作和安全飞行。目前，该系统正在进行机器学习算法训练及系统调试，保证系统可以独立分析数据和检测偏差，从而提高系统的适应性和信息处理能力，降低维护成本，延长发动机的使用寿命。

GE 航空航天公司与微软公司合作研发 AI 平台用于公司运营

2024年9月，GE 航空航天公司宣布与微软公司合作完成人工智能助手（AI Wingmate）开发。这是一种基于 Azure AI 的生成式人工智能驱动工具，供GE 航空航天公司52000名员工使用，旨在提高整个公司运营的生产、协作与创新能力。通过人工智能系统，使用者能够与人工智能进行对话，催生航空航天业的新想法与解决方案。自推出以来，该系统支持了约50万次的互动，正在改变所有人的工作方式，能够协助员工更高效地完成日常任务。GE 航空航天公司还计划通过一个新的模块扩展人工智能系统的能力，新模块将基于公司专有的精益运营模型Flight DECK构建，帮助员工更好

地了解精益运营模型。

结束语

2024年，航空发动机领域数字化技术发展呈现如下特点：一是基础理论与方法的进步和以超级计算机为代表的先进设备的应用，持续推动了高精度建模仿真能力的创新发展，大大减少了设计试验阶段工作量，有效降低研制费用，缩短研制周期，助力科学高效推断与决策；二是以增材制造技术为核心的先进智能化生产制造方法逐步成熟，材料和工艺不断创新，应用持续深入，为航空发动机制造领域带来新的思想和实践；三是AI技术正在渗入航空发动机全生命周期的各个环节，逐步呈现出“小切口，大纵深”的发展应用态势，体系化效能开始发挥。航空发动机数字化转型的战略地位与核心价值正日益凸显，成为行业破局的核心所在，是航空发动机企业保持核心竞争力的关键力量。

航空动力

（付玉，中国航空发动机研究院，高级工程师，主要从事航空发动机科技情报研究）