

2024年数字工程进展

Progress of Digital Engineering in 2024

■ 王乐 王巍巍 / 中国航发四川燃气涡轮研究院

2024年全球数字工程加速发展，各国通过政策引导与技术攻坚推动军事装备革新。美国强化数字工程在武器采办中的应用，欧盟聚焦人工智能安全框架，俄罗斯力推工业软件国产化，同时，头部航空发动机企业呈现差异化布局。

数字工程已经成为武器装备敏捷、高质量研发的重要途径。2024年，全球主要军事强国发布了多份政策和规划指导数字工程自上而下落到实处；罗罗公司、GE航空航天公司、联合发动机制造集团（UEC）等头部航空发动机企业加大了数字工程关键技术研究力度，通过典型型号试点和应用，在航空发动机研发、制造和维修保障等全生命周期不同阶段均取得了重要突破。

全球加速数字工程布局，政策及办法密集出台

从2024年发布的文件来看，关注重点为数字工程能力评估、数字工程实施方案、数据安全及人工智能（AI）。值得注意的是，数据安全在多份顶层文件被提及，可能会成为未来几年数字工程重点发展方向。

美国陆军发布数字工程指导意见，扩大数字工程在武器系统采办中的安全应用

2024年5月，美国陆军发布《数字工程》（2024-03）指令，依据国防部《适应性采办框架》（5000.02）和《数字工程》（5000.97）指令，指导陆军扩大并制度化规范数字工程

A Framework for Assessing the Costs and Benefits of Digital Engineering

A Systems Approach



兰德公司《评估数字工程成本和效益的框架》研究报告

在武器系统采办中的实践应用。文件中，陆军将车辆、航空、模块化传感器列为数字工程重点领域，通过与工业界和标准机构合作，在数字工程实施中寻求通用性和“数据中心性”；设立和监督未来远程攻击机（FLRAA）、“黑鹰”直升机、“阿帕奇”直升机等试点项目推进数字工程实践应用；对从事需求、试验和维护的人员进行培训，全面提升员工数字素养。2024年6月，陆军通过政府公开信息征集平台公示了

《数字工程能力保护要求政策草案》，明确了陆军数字工程能力应包括陆军数字工程数据、数据存储和处理工具，以及所有数字工程工件，提出了数字工程应满足包括国防部制定的非机密信息保护规定在内的所有网络安全保护要求。

美国顶尖智库深入开展数字工程技术研究，献智规划实施和落地

2024年3月，美国智库兰德公司发布了《评估数字工程成本和效益的框架》研究报告，在总结美国国防部数字工程实践现状以及对数字工程和基于模型的系统工程（MBSE）成本与效率评估经验的基础上，给出了基于国防部成本与效益分析（CBA）方法和系统工程决策方法的数字工程成本与效益评估框架，围绕关键性能参数（KPP）和关键系统属性（KSA），建立了可量化的数字工程效益评价指标，并使用逻辑模型方法和成本分解矩阵，提出了一种权衡研究方法，可用于比较和选择多种数字工程活动选项。2024年5月，美国米切尔航空航天研究所发布报告称，数字工程已经超越了传统的计算机辅助设计，有助于企业实时了解设计信息，同步了解更改，实现并行开发，促进装

备敏捷、高效部署。为进一步推动数字工程应用，研究所向美国空军提出了6项实施建议：一是设立激励计划，鼓励国防承包商应用数字工程；二是全面审查所有在研项目，筛选出适合全面数字化或部分数字化的项目，推进数字工程应用；三是开展采办数字化培训，促使采办人员应用数字化工具和流程；四是制定系统数字化“开放性标准”，促进不同项目间的交流，实现部分要素跨项目的重用；五是建立“数字工程工具库”，提供给国防采办供应商使用，逐步建立“数字生态系统”；六是国防主承包商及供应商应保证信息基础设施的安全性，并持续改进。

全球高度重视人工智能技术布局，塑造数字工程核心驱动力

2024年5月，欧洲航空安全局（EASA）发布了《人工智能概念文件》第二期，这是人工智能路线图的重要一步。本期文件细化了1级人工智能应用（增强人类能力）的指导，并深化了对“学习保证”“人工智能可解释性”和“基于道德的评估”的探索。二期文件发布标志着EASA人工智能路线图进入第二阶段（框架整合），其中规则制定任务（RMT）-0742将促进将人工智能概念文件中的预期指导整合到综合框架中通用规则和可接受的合规方式（AMC）。这些规则和AMC经过精确定制，将满足受新技术影响的每个航空领域的独特要求。2024年10月，时任美国总统拜登发布了人工智能新国家安全备忘录，指示国防各级部门通力合作，在30天内成立工作小组，为国防部和情报部门快速应用人工智能，解决相关技术安全问题提出解决方案。2024年12月，美

国国防部首席数字与人工智能办公室（CDAO）成立了人工智能快速能力小组（AIRCC），并在2024年和2025年投入1亿美元，构建AI就绪技术栈，完成以生成式AI为重点的试点项目、试点沙盒环境搭建及以用户为中心的试验工作。

航空发动机企业积极开展数字工程转型，侧重点各有不同

2024年，罗罗公司、GE航空航天公司、MTU公司和UEC等航空发动机头部企业积极开展数字工程关键技术攻关和部署。罗罗公司2024年度的关注重点为AI赋能产业生态决策智能化；GE航空航天公司更注重AI在业务工作中的实际应用；MTU公司的核心目标为探索构建数字孪生发动机；UEC致力于快速实现数字化软硬件国产化替代。

罗罗公司利用AI技术支持战略决策

2024年1月，罗罗公司与AI系统开发商Aerogility公司签署了一份为期5年的基于AI的企业数字孪生系统开发合作协议。Aerogility公司的系统是一款决策支持软件，可以将产品设计和企业知识与实际运营数据相结合开展分析，生成预测性维护建议，以优化机队利用率。罗罗公司计划将该系统应用于涵盖所有合作伙伴和客户的价值链。

GE航空航天公司提升AI应用能力

2024年9月，GE航空航天公司与微软公司合作开发了人工智能助手（AI Wingmate），通过实时对话，辅助员工更高效完成日常任务，催生新想法与解决方案。未来，GE航

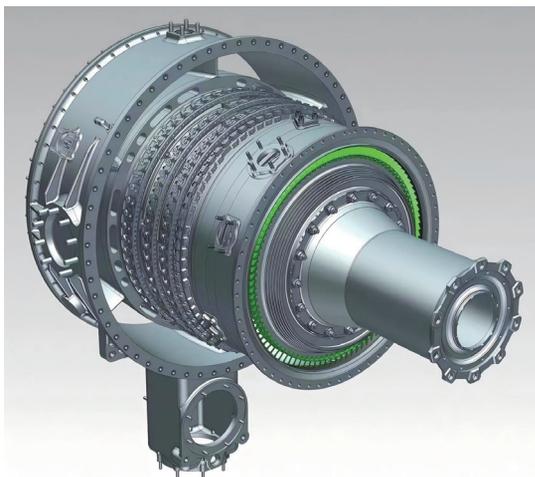
空航天公司将基于自身专有的精益运营模型Flight DECK开发新的模块，扩展人工智能系统能力。同月，GE航空航天公司加入了国家标准与技术研究所人工智能安全研究所联盟（AISIC），该联盟由280个政府和行业组织组成，初衷是为AI的应用提出指导方针和政策建议，共同提升用户的使用安全责任意识。

MTU公司聚焦数字孪生发动机开发

2024年5月，MTU公司计划将数字孪生技术应用至发动机从研发到运营的全生命周期，并通过组建专家团队，开展技术部门间的协作，共同推动虚拟发动机的实现。此外，MTU公司明确了构建虚拟发动机的3个重要因素：数据采集、流转和处理的高度自动化；不同学科的高度融合；利用人工智能提高预测和分析的精度。目前，MTU公司正在通过压气机叶片数字孪生项目测试该项技术在设计阶段应用的可行性。

UEC数字环境自主可控取得重大突破

2024年5月，俄罗斯在下诺夫哥罗德举办了第九届俄罗斯工业数字产业大会，UEC在会上介绍了其在数字化方面的重要成果。目前，UEC正在自主开发系统工程和产品全生命周期管理工具、资源管理系统及虚拟仿真平台三大平台。国产产品全生命周期管理（PLM）系统T-FLE已经搭建完成，正在进行系统优化及复合材料、控制系统、机身和机翼等模块设计；资源管理系统使用1C平台，集成了生产企业和设计局的条件资源和产品质量管理模块；虚拟仿真平台将在俄罗斯国产超级计算机和LOGOS软件的基础



AI-222-25 航空发动机数字孪生模型

上开发。UEC 正在进行计算机辅助设计 (CAD) / 产品数据管理 (PDM) 类软件的改进工作, 正在开发航空发动机复合材料零件设计 PLM 和 CAD 领域工程软件及航空发动机供应链项目管理系统, 总投资将达 20 亿卢布。到 2026 年年底, 俄罗斯将完成 PLM 和 CAD 类软件的国产化替代, 并计划将其用于 PD-35 和 PD-8V 等未来发动机的研发。

数字工程应用正逐步扩展至航空发动机全生命周期

2024 年, 航空发动机制造商加速数字工程在型号研制中的应用: 研制阶段, 以 UEC 为代表的主要航空发动机企业以数据和模型为驱动, 助力航空发动机部件设计和试验; 制造阶段, 通过引入增材制造等先进技术, 显著提高了航空发动机生产效率和质量; 维保阶段, 数字工具和方法的应用程度加深, 逐步向动态化、智能化和可持续方向发展。

设计研发阶段: 数字工具和方法驱动设计和试验革新

2024 年 5 月, UEC 与莫斯科国立

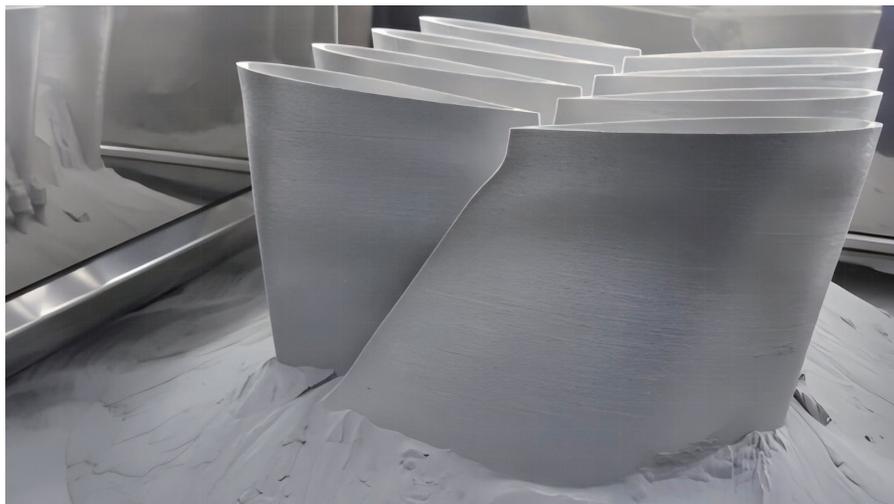
大学联合开发了一款数学计算软件, 用于航空发动机低压压气机第一级叶轮自振调试, 通过在设计阶段进行数学建模, 大幅缩减了物理试验的次数, 加快了发动机认证速度。该项目入围“CIPR 数字-2024”奖。

2024 年 5 月, UEC 采用智能视觉方法分析风扇工作叶片双锁结构元件的静强度试验和循环寿命试验结果, 并建立了 1 个神经网络模型, 根据试验过程中获取的图像来确定燃气涡轮发动机叶片的振型。

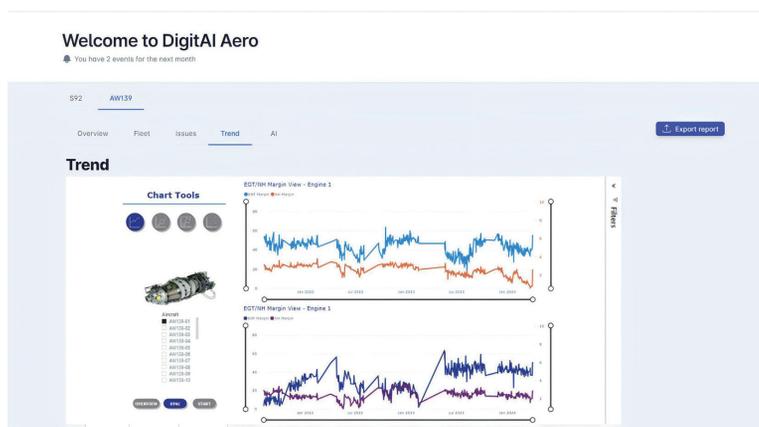
2024 年 6 月, UEC 完成了 AI-222-25 发动机数字孪生项目。系统基于帝国理工大学自主开发的 CML-Bench 平台构建, 第一阶段的重点是将 AI-222-25 系列发动机的数千个部件数字化, 第二阶段的重点为构建 AI-222-25 改进型的数字孪生系统独立组件。

生产制造阶段: 创新技术应用凸显成效

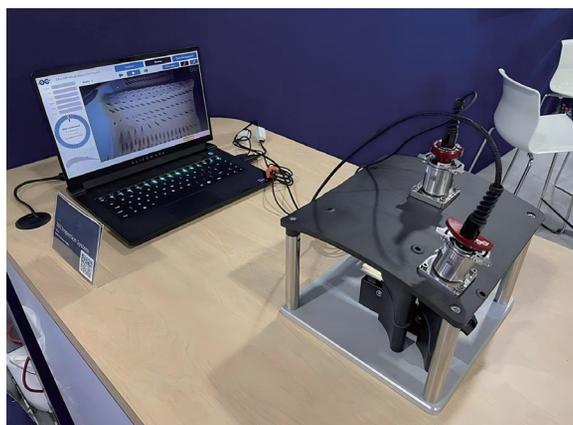
2024 年 8 月, 西班牙 ITP Aero 公司利用选择性激光烧结 (SLS) 技术打印出了 TP400 发动机尾部导流片,



ITP Aero 公司 3D 打印航空发动机部件



ITP Aero公司人工智能管理平台



GE 航空航天公司人工智能叶片检查工具

成功建立并认证了高温航空发动机部件的增材制造标准和规格，成为首个使用增材制造技术生产航空发动机结构部件并取得EASA认证的公司。据悉，ITP Aero公司在西班牙总部设立了专门的增材制造机构，并投资2400万欧元建设新的先进设计与制造创新研究工程（ADMIRE）研发中心，专注包括增材制造在内的先进数字制造技术。

2024年10月，美国Beehive Industries公司宣布将使用3D打印技术开发新型小型喷气发动机，采用5个3D打印金属部件制造推力为890N的发动机，将推力为2223N的发动机原型机零件从2000多个减少至140个。

维修保障阶段：数字解决方案赋能更深层型号服务优化与创新

2024年4月，ITP Aero公司展示了自主开发的先进人工智能数字发动机管理平台Digital Aero。该平台可以利用人工智能分析所有飞行数据，计算评估发动机分解数据。平台还配置了一个聊天机器人，使用户参与实时对话，访问大量信息和文件。平台通过定制开发，简化用户日常工作和决策。

2024年6月，TGIS航空公司推

出一款名为“Optima”的数字系统。系统设计了专门的发动机维护计划模块，运行后预计每架飞机可以节约100万~200万美元维护费用。Optima还可以修改计划，重新分配发动机，将成本影响降至最低。此外，系统还会考虑特定的飞行约束条件，如每月发动机的最多更换次数、发动机可维修阈值以及最短的在翼时间等。

2024年7月，GE航空航天公司将机器学习模型整合到自动检测流程和预测性维护服务中。在预测性维护方面，GE航空航天公司在远程监控诊断中心全天候监控发动机数据，收集了其44000台在役发动机每次飞行的数据，将数据与物理模型和环境细节相结合，在问题出现之前预测维护问题。在增强检测方面，GE航空航天公司将AI应用在维护、修理和大修（MRO）中，使用机器人完成自动化检测及标准图像捕获，并将图像输入机器学习模型训练AI算法。此外，GE航空航天公司还利用AI、数据分析和机器人技术，提高车间的白光检测能力，自动检测零件裂纹扩展。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。此前，GE航空航天公司已将BIT成功应用于GENx发动机的第一级和第二级高压涡轮叶片，在提高叶片检查质量和准确性的同时，将检查时间从3h缩短到1.5h。

结束语

得益于国家层面的大力支持及AI技术在政治、经济、军事领域的快速应用，2024年数字工程发展势头迅猛，尤其是数据安全受到了前所未有的关注。欧美通过发布顶层发展战略，提供详细实施建议指导，数字工程实施主体正在逐步下沉至工业界。而俄罗斯受西方制裁影响，更关注数字工程的生命工程——基础软硬件的自主可控。与此同时，工业界通过关键技术研究及航空发动机典型型号试点，正在逐步将数字工程应用至航空发动机研发、制造到维修保障的全生命周期，其中维修保障是数字工程应用最早、成效最为显著的全生命周期阶段，近几年仍将成为数字工程的主要发力点。

航空动力

（王乐，中国航发四川燃气涡轮研究院，高级工程师，主要从事航空发动机科技情报工作）