

人工智能在航空发动机全产业链中的应用

Application of AI in the Entire Industry Process of Aero Engine

■ 谭米 秦亚欣 / 中国航空发动机研究院

人工智能（AI）技术正成为全球经济增长的重要驱动力，为各行业带来深刻的变革。根据咨询公司埃森哲（Accenture）测算，到2035年，AI可以将全球制造业的附加值提高近4万亿美元。AI在航空发动机领域也展示出了巨大的潜力和广阔的前景，在未来，对待AI技术的重点不在于是否使用它，而是如何使用它。

近年来，以GE航空航天公司和罗罗公司为代表的先进航空发动机制造企业正积极地将AI技术运用到航空发动机设计、试验、生产制造和运营维护等各个环节，满足未来先进航空发动机研发迭代、快速试制、全产业链协同和主动式服务的发展需要。

AI在设计环节的应用

在产品的设计环节，AI有助于构建模型，实现航空发动机性能的快速预测，加快计算流体力学（CFD）的计算，从而推动设计过程的加速迭代与优化，改善设计模式。具体来说主要包括以下几个方面。

模型和方法的智能构建

航空发动机设计过程中涉及的结构力学、流体力学、空气动力学、燃烧等学科都是工程科学，其发展依赖于基本方程、基本模型和计算方法。利用机器学习（ML）方法建立的模型与传统的模型相比具有高效性、跨尺度性的物理特征描述能力，在计算精度和计算效率上有潜在的优势。华为公司与西北工业大学合作的流体力学仿真智能化大模型“秦岭·翱翔”，在开源流体计算软件“风雷”的基础上研发，能够对多尺度复杂湍流场实现更高精度

求解，在典型翼型大迎角分离流动、典型翼身组合体跨声速扰流模拟上，做到了模拟精度、求解效率较传统模型提高数倍。

性能快速预测

航空发动机的数值仿真与试验测量产生了大量数据，利用这些数据构建基于ML的代理求解器进行快速性能评估与预测成为一个新趋势。常见的数据驱动代理模型包括多项式响应面模型、人工神经网络、多输出高斯过程（MOGP）等。美国国家航空航天局（NASA）格伦研究中心推出了一款航空发动机AI应用软件，可以对发动机的设计方案进行评估，目前版本侧重于对传统涡扇发动机进行性能预测，可根据用户输入的设计参数，快速生成发动机质量、核心机尺寸、叶片级数和燃油消耗率等预测数据。

设计模式优化

近年来，以ML为代表的人工智能算法开始陆续应用于优化实践以提升优化效率。ML可以提高CFD求解器中子问题的效率和鲁棒性，从而节约CFD计算的成成本。ML另一个具有巨大潜力的领域是主动流动控制，其中许多方法（如高斯过程回归、遗传规划和深度增强学习等）具有发现非常有效的策略的潜力。

GE航空航天公司正在开发一种AI驱动的设计工具——数字线程设计（DT4D）。该工具可以将产品设计时间缩短一半，并使特定工业组件的设计迭代次数增加数百万次，以进一步优化新设计。原理是将其工作流程知识以及空气动力学、热力学和机械设计方面积累的数据和知识相结合，纳入AI驱动的神经网络，该网络可以几乎即时地完成需要在1000个计算机处理器（CPU）上进行10000年的超级计算。

AI在试验环节的应用

在航空发动机试验验证环节，AI可以优化试验方案设计，实现试验过程智能化管理，对试验数据进行分类、回归、关联和特征提取，建立数据分析平台和机器学习平台，推进以虚拟试验替代物理试验，大幅缩短产品试制周期。

试验方案管理

在试验方案设计阶段，通过创建数据驱动模型，对试验台架设计方案和试验方案等进行论证和评估，从而优化实物试验方案设计，如传感器布置位置和个数，以及确定激励位置等，从而提高试验效率。2022年，美国空军试验中心与Ansys公司合作，通过AI模型评估武器系



图1 航空工业空气动力研究院“智慧风洞”架构

统的数字化试验方法，推动降低物理试验（地面和飞行）基础设施的使用频次、加快大型试验项目的进度、减少高敏感度项目的公开飞行试验。

试验数据分析

利用AI技术强化试验数据采集、分析、处理的自动化水平，一方面能够为试验故障诊断以及发动机设计改进提供依据；另一方面可以有效降低试验重复成本。罗罗德国公司与工业软件Altair公司合作，将AI与工程技术相结合，重点解决结构分析和测试问题。通过数据科学来处理大量的工程测试数据，以大大减少测试所需的传感器数量，仅此一个用例就有可能将重复成本减少数百万欧元。

智能虚拟试验

虚拟试验以多维传感器为骨架，以试验数据为驱动，以人工智能、机器学习技术为主体，以数字孪生为终端，已经融入到装备设计、研制、开发、集成的各个阶段，成为与实

物试验并重的一种新的航空产品研制试验途径。航空工业空气动力研究院推出的“智慧风洞”如图1所示，建立了基于三维视景的厂区、可移动风洞部段、试验设备、试验模型、部件的数字化平台，实现了数字孪生系统的同步运行。同时，基于多源数据融合的机器学习技术，开展了关键设备健康监测算法研究。

AI在制造环节的应用

航空发动机零件结构复杂、精度要求高，工人的技术水平在很大程度上决定了产品的合格率。将AI技术与工业机器人、数字孪生、虚拟现实（VR）、增强现实（AR）、增材制造（3D打印）等新兴技术，以及数据采集监控、生产执行系统（MES）等工业软件融合，可以降低人在复杂、苛刻环境下的参与程度，提高制造执行过程的准确性和生产效率，提升产品质量。

智能化数据采集

国外在智能装配采集系统的研

究上起步早，并形成相关标准，如企业系统与控制系统集成（ISA-95）等通用国际标准规定。GE航空航天公司的数据采集监控软件（SCADA）可实现工厂操作可视化，并为上层分析程序提供实时数据，基于大数据分析技术进行故障诊断和预测，提高现场设备运行故障的响应速度，降低设备停机率，延长机床使用寿命。而其MES能够基于生产数据，创建一个能随时随地提供分析、报表的“虚拟工厂”，利用AI技术分析生产数据，识别瓶颈和低效环节，提出改进建议，优化生产流程。

智能化装配

在产品装配过程中，可通过图像识别技术对装配的质量问题进行快速分析检测，自动识别缺陷和不合格产品，从而减少废品率，提高产品质量；通过VR、AR技术对装配操作过程进行在线指导，降低装配差错。罗罗公司在其创下全球航空领域最大功率纪录的动力齿轮箱

制造中用到了“虚拟现实洞穴”交互系统。该系统由巨大的立体投影屏幕和跟踪体系组成，能在正确的视角下以1:1的比例显示三维模型。利用基于机器视觉的检测防错方法和基于投影增强现实的可视化引导方法，可有效提高装配效率。

赋能3D打印

3D打印技术在航空发动机领域的应用逐渐扩展：GE9X发动机采用了304个3D打印零部件；赛峰集团宣布其下一代航空发动机上3D打印部件的占比将达到25%。将AI与3D打印技术相结合，可以有效突破3D打印面临的技术瓶颈，提高3D打印的效率。英国剑桥的一家人工智能公司Intellegens开发的一种新的ML算法Alchemite™已被用于设计一种新的金属3D打印镍基合金，可为团队节省大约15年的材料研究时间和大约1000万美元的研发成本，该合金可用于发动机零部件制造。

供应链优化

AI有助于提高供应链的效率和灵活性，通过预测市场需求、优化库存管理、物流等环节，降低成本并提高服务质量，实现更精细化的运营。在预测分析方面，AI工具可以通过分析历史销售数据和市场趋势，预测未来的产品需求，从而帮助企业更好地规划生产和库存管理。在供应商管理方面，AI工具可以通过分析供应商的绩效数据、信用记录和市场声誉，辅助企业选择合适的供应商和合作伙伴。在仓库管理方面，AI可以通过分析仓库的布局、货物的属性、运输需求等信息，优化仓库的作业效率和库存管理。AI工具还可以分析供应链中的潜在风险和异常情况，并提供实时的风险

管理和决策支持。

AI在维护保障环节的应用

在服务保障环节，通过对产品使用状态的实时感知，能够智能化地快速形成维护、修理方案，建立备件预测与优化配置模型，实现航空发动机的预测性维护，提升服务保障能力。航空发动机现场维修过程中，AI驱动的检测工具有助于提高操作规范化，提高人员工作效率和工作质量，缩短维护、修理时间。

智能化检修

传统的无损检测方法通常需要人工干预和手动分析，AI可以用来创建自动化检测系统，自主识别无损检测数据中的模式、趋势和异常，从而提高检查的效率和准确性。GE航空航天的子公司OC Robotics推出了一款AI驱动的先叶片检查工具，用于GENx发动机的翼上检查。这项技术可以将检测时间从3~4h缩短到30~45min。罗罗公司创新中心研发的智能孔探仪可将检查发动机的时间缩短75%，5年内节省检查费用高达1亿英镑。该孔探仪可通过配备的AI应用软件（APP）捕捉发动机数据，将所有数据直接发送到罗罗公司的Azure云端作进一步分析，完成离线自动化检查。

预测性维护

长期以来，预测性维护一直是维护、修理和大修（MRO）领域不可或缺的一部分，而AI能结合实时传感器数据与历史故障数据生成预测性维修建议，从而减少停机时间和总维修成本。罗罗公司开发了可快速访问发动机服务的汇集每个机场的天气条件、设施、飞机滑行情况和周转时间等数据的AI APP，自

动分析这些因素对发动机的影响，以修正调整维修时间。GE航空航天公司组建了基于数字技术的机队支持小组，建立了基于大数据的预测式服务保障及智能决策模式，每年处理超过1.2亿个数据包，为3万多台商用发动机提供支持。

结束语

数据、算力和算法是推动AI发展的三大基础要素。相对汽车等大规模制造行业，航空发动机制造批量小、数据量少、离散性强，因此有必要加强数据采集、存储与分析。GE航空航天公司与罗罗公司都建立了专门的数据处理部门，同时与英伟达、微软、亚马逊等芯片和云服务商，以及人工智能初创企业合作，拓展AI在发动机全产业链的应用范围，有效地提高了研发、生产和经营效率。

今年以来，以ChatGPT为代表的生成式人工智能成为各行业关注的热点。传统人工智能通过数据分析、机器学习等方式实现自动化控制、决策支持和效率提升，而生成式AI则侧重于创新设计、知识生成和个性化服务。相比于传统AI，生成式AI并不很适合发动机异常检测、生产分析等任务，甚至也不适用于航空发动机的设计与试验。生成式AI目前的主要应用场景是客户服务与设备维护指导等方面，未来有可能赋能数字孪生与工业机器人。因此，生成式AI与传统AI技术互为补充，需要根据实际应用场景合理加以运用。

航空动力

（谭米，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）