

罗罗的智能发动机愿景分析

Analysis to the Intelligent Engine Vision of Rolls-Royces

邵冬 / 中国航发研究院

在2018年新加坡航展上,罗罗公司在民用航空发动机领域推出了智能发动机(IntelligentEngine)愿景。随后,罗罗公司不断丰富和完善该愿景,并对大数据分析、智能机器人、物联网、虚拟现实等热点技术与航空发动机技术进行了成体系的融合。

美国国家航空航天局(NASA)格伦研究中心在21世纪初提出了智能发动机概念,这一概念重点关注通过主动控制技术打造航空发动机的自适应能力,所涵盖的范围较为狭隘。十几年来,智能概念在航空发动机领域方兴未艾,其内涵也随着技术日新月异的发展有了极大的丰富。为在新兴的技术领域的角逐中获得优势,航空发动机制造商纷纷厉兵秣马,基于自身的技术特点以及对智能技术未来发展趋势的判断落子布局。例如,普惠公司宣布推出服务品牌EngineWise,以升级发动机维护策略;GE公司基于物联网技术推出了Predix平台,并成立子公司负责该平台的开发运行;罗罗公司则提出了智能发动机愿景。

罗罗公司这样概括智能发动机愿景(如图1所示):将数字、智能技术融入航空发动机设计、测试和维修中,并进一步将发动机本身和发动机服务融合在一起;通过增强互联性、情境感知和理解力,智能发动机将逐步提升效率和可靠性,发动机将在更广泛的运营环境中不断互相学习,调整自身行为,实现更高性能。另外,发动机不仅能够知道什么时候需要维修,而且能够实施自我维修。之后,罗罗公司进



图1 处于互联状态的智能发动机愿景

一步描绘了智能发动机愿景中的重要组成元素(如图2所示),如会思考学习的发动机“大脑”、游走于叶片表面的检测机器人、通过增材制造

生产的零部件和电动推进等。这种概念想法是罗罗公司结合了航空发动机从产品设计到维修保障等不同环节的发展需求,受智能化、数

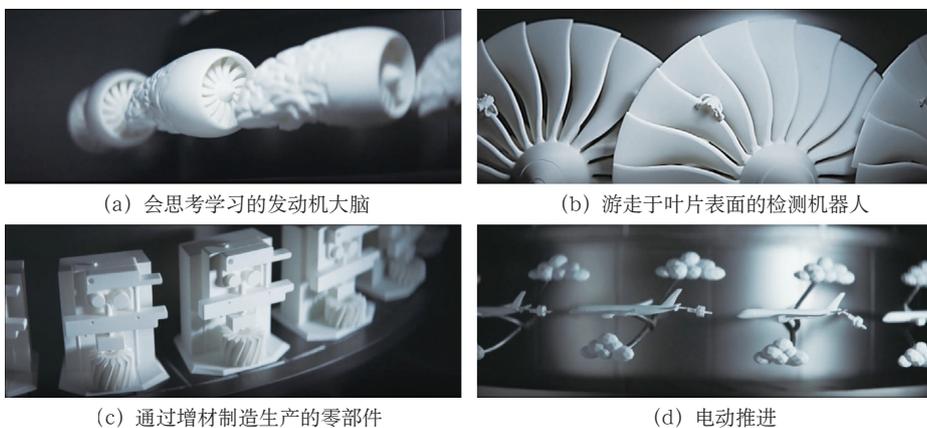


图2 智能发动机愿景的重要组成元素

字化、机械化等多方面技术融合带来的驱动所提出的。

为促进智能发动机愿景的实现，罗罗公司提出在以下多个相互关联的创新领域进行技术推动：数字与数据技术、可用性和智能维修技术、先进制造技术以及电气化技术。

数字与数据技术

发动机在使用过程中将不可避免地面临性能下降、寿命消耗、发生故障等，对于发动机状态的评估与预测的传统解决思路是将物理机理建模与实验数据修正相结合。然而，由于发动机运行中涉及的影响因素众多、物理关联复杂、随机性强，基于物理机理建模通常蕴含较多的简化与假设，加之试验数据一般是在特定情况下得出的，仅能反映发动机的通性，在设计阶段较为有效，而在使用运行阶段会受限。

同时，即使是同型号的发动机之间也存在生产制造、使用条件差异，因此对于每台发动机而言，它既包含群体的通性，也有个体的特性。而基于数据驱动，结合智能算法的解决方法是研究人员目前更为青睐的方向。发动机历史数据库是发动机运行时各类影响因素的综合体现，虽然其背后隐含的在多变使用条件下性能衰减、寿命消耗的规律复杂且近似不可知，但智能学习算法通过其强大的非线性处理能力在海量数据规模的支持下能逼近这些规律。

为此，罗罗公司积极与微软公司开展合作，借助微软 Azure 物联网云平台技术对地理位置分散的不同数据源进行收集与汇总，形成对发动机运行数据的管理与整合。同时，

罗罗公司内部设立了致力于发动机全生命周期数据分析工作的R2数据实验室，借助人工智能和机器学习手段，加速对数据的解读分析，构建发动机的数字孪生体。

大数据的分析结果在发动机优化自身运行策略与维修策略方面已取得了不错的成效。例如，在复杂的气象条件下，飞机与发动机常规的运行策略难以应对，发动机安全性与经济性将受到威胁。在冰岛火山爆发期间，火山灰会升至6000m的高空，形成的火山灰云散布在整个欧洲西北部地区。而被吸入至发动机内的火山灰会附着在风扇及压气机叶片，造成涡轮冷却通道的堵塞以及叶片腐蚀（如图3所示），多数航空公司选择停飞并承受了大量经济损失。罗罗公司基于发动机运行数据与气象条件的分析，综合考虑了安全性与经济性，给出了发动机可承受火山灰影响的适宜飞行高度与时间，为航空公司挽回了停飞的损失。另外，在其他大气事件，如沙尘、飓风等，罗罗公司也将运用此类技术评估发动机受到的影响，以改善运行策略。可以想象，即使

在突变的环境条件下，智能航空发动机利用其强大的互联能力与场景理解能力“见机行事”，实时优化当前条件下的运行策略，安全经济地完成飞行任务。而且，基于大数据分析的性能衰退与剩余寿命预测还可以帮助航空公司合理规划维修工作，避免计划外停运，使发动机的在翼时间最大化。罗罗公司称，其发动机健康管理（EHM）系统在1年中帮助航空公司避免了近70%的潜在发动机维修工作，这将为航空公司省去可观的维修费用。

罗罗公司总工程师菲尔·科诺克（Phil Curnock）认为，智能发动机将其拥有的计算能力与数据整合在一起提供给用户，从而增加产品对用户的价值。伴随物理状态信息的普遍数字化、数据存储成本下降以及通信技术进步，发动机系统产生的数据量、类型与维度较之以前将极大丰富，形成了具备大数据规模的海量数据集，对数据分析带来了巨大困难和严峻挑战。据统计，罗罗公司在全球范围内通过发动机健康管理系统监测了13000余台在翼发动机的性能，每台发动机在一次



图3 火山灰堵塞涡轮叶片冷却通道

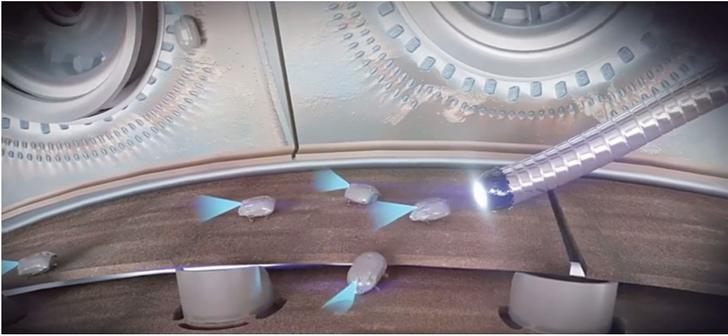


图4 SWARM集群机器人被送入发动机内部进行检测

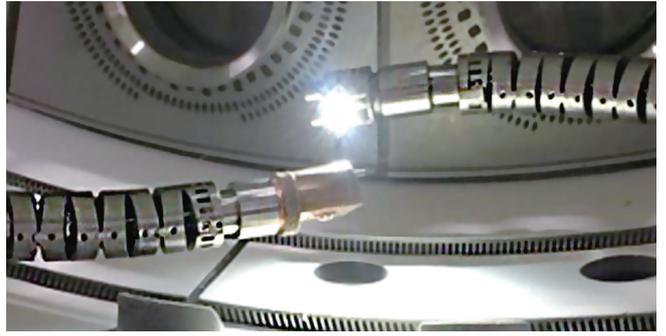


图5 FLARE蛇形机器人修复燃烧室涂层

飞行中产生的数据多达太字节 (TB) 量级, 而且罗罗公司积累的数据量正在以每两年翻倍的速度增长。目前受限于通信带宽, 各发动机运行的详尽数据仍难以实时传输至地面或与其他发动机系统共享, 罗罗公司展望未来智能发动机将摆脱“信息孤岛”的状态, 具备强大的互联互通功能, 实现发动机之间的通信。

可用性与智能维护技术

罗罗公司可用性服务高级副总裁李·麦康内洛盖 (Lee McConnell) 表示, 智能发动机的可用性应尽可能接近 100%, 这意味着智能发动机应具备及时快速的维修能力。为达到这种高可用性, 上文提到的大数据分析可对发动机进行精准的故障寿命预测。此外, 罗罗公司还打算借助先进的机器人技术对维修方式进行革新, 以实现发动机的在翼检查、维护和修理。鉴于发动机内部复杂与狭小的空间, 机器人应满足尺寸小, 动作灵活, 在完成检查、清洁和修复工作的同时避免接触其他部件等要求。目前, 罗罗披露较多的机器人项目为集群机器人 SWARM、蛇形机器人 FLARE 和 CORBA。

SWARM 集群机器人直径约为 10mm (如图 4 所示), 该尺寸允许机器人在不拆解发动机的情况下爬

行至人工难以直接观察的区域进行视觉检查。这些机器人将携带小型摄像机, 将实时视频反馈给操作员, 从而使操作员在发动机在翼时能够完成快速的目视检查。CORBRA 蛇形机器人针对的是远程维修场景中的叶片激光修复问题, 当地的维修团队可将机器人的操控权交至云端的技术专家。而 FLARE 蛇形机器人则着重于发动机在翼状态下的燃烧室、涡轮的涂层修复工作 (如图 5 所示)。罗罗公司在翼维修技术专家詹姆斯·凯尔 (James Kell) 认为, 这些机器人技术为进入发动机提供了新的方法, 从而可以完成目前传统在翼检查与修理难以做到的工作。

可以预见, 未来智能发动机在进行维修时, 将能够在无人干预的情况下, 由智能机器人遵循大数据分析的故障定位结论自动开展修理工作, 最大程度地保障发动机在翼运行时间, 并降低发动机维修成本。

先进制造技术

罗罗公司的智能发动机构型未明确指定是基于齿轮传动的“超扇”(Ultra Fan) 发动机, 亦或是融合电气化的电动推进方案。不论是哪种构型, 先进制造技术都是智能发动机物质实现的基础, 因为高性能动力系统

中的新材料与新结构的高效应用需要通过先进的制造技术承载。罗罗公司通过对工业物联网、虚拟现实 (VR)、增材制造等技术的引入, 在智能生产车间搭建、复杂组件装配以及轻量化、整体化零部件加工等方面受益匪浅。

叶片加工精度要求高, 时常存在叶片加工超差需要返回上游工序的情况, 这导致了叶片加工工作流程经常反复, 容易出现错误, 因此罗罗公司构建了基于物联网的叶片智能生产车间。在智能生产车间中, 每一个在生产的叶片均有自己的路由器与编号, 时刻与车间保持通信。工程师可以通过网络便捷地查询叶片的位置、所处工序、加工进度以及出现的问题。人工智能 (AI) 系统将统一调配车间的加工力量, 根据叶片加工质量, 动态更新调整对每个叶片的加工计划。

罗罗公司表示 VR 技术在超扇发动机的装配制造中起到了重要的作用。大涵道比的超扇发动机采用了齿轮传动结构来连接风扇转子与涡轮转子, 齿轮箱需要传输大约 52MW 的功率, 刷新了目前航空发动机领域的最高纪录。研究团队借助 VR 技术对该齿轮箱进行了多次模拟组装调试, 为最终的实际装配提供了有利指导 (如

图6所示)。

增材制造技术可以将原本通过多个构件组合的零件进行一体化“打印”，实现了零件的结构整体化，避免了多个零件组合时存在的连接结构（法兰、焊缝等）。一体化结构的实现，除了带来轻量化的优势，减少的组装成本也为企业提升了生产效益。而且，增材制造技术可以使薄壁、尖角等形状完成传统制造方式无法达到的极限尺寸，减少设计人员的设计约束。在进行发动机复杂零部件设计时，设计师由过去以考虑零部件的可制造性为主，转变为增材设计思维下的实现零部件功能性为主，如此将有利于孵化出更具有创新性的构型。罗罗公司新研制的“超扇”发动机核心机 Advance 3中，部分零部件采用了增材制造技术，数百小时的测试显示这些零部件的性能良好。

推进技术电气化

罗罗公司一直致力于将当前的涡扇发动机变得更加高效，同时积极开拓更为清洁、安静的电动推进之路，罗罗公司认为电气化技术可以带来



图7 ACCEL项目原型机

媲美从活塞式发动机到喷气发动机的变革。因此，电动推进技术也被罗罗公司视作智能发动机愿景的重要组成部分，为智能发动机的实现提供支撑。

罗罗公司还主导了加速飞行电气化计划（ACCEL），计划中的单座验证机将在今年尝试创造全电动飞机的飞行速度纪录，达到不低于480km的时速（如图7所示）。另外，罗罗公司、西门子公司（参与项目的电动航空部门已被罗罗收购）与空客公司在欧盟逐步削减航空业碳排放的背景下联合启动了E-FanX项目。该项目的技术验证机平台为

BAe146/RJ100支线喷气机，其中的一台发动机被替换为电动推进系统，它需要为飞机提供MW级的动力输出。2020年4月24日，空中客车首席技术官格蕾丝·维塔迪尼（Grazia Vittadini）对外宣布，E-Fan X混合电推进飞机项目正式结束，E-Fan X项目在混动架构、高压系统和电池方面取得阶段性成果，探索了混合电推进系统的可行性和局限性。

结束语

通过对罗罗智能发动机愿景分析可以看出：一方面，智能技术效用的发挥仍需要强大的机械化载体，因此，罗罗公司的智能发动机愿景同样对加工制造、机器人、电动推进技术等予以特别关注；另一方面，发动机各环节产生的数据已成为珍贵的资源，发动机制造商通过存储发动机在生产制造、运行维修等方面海量数据，结合云计算、机器学习等智能技术，实现从数据信息到知识智慧的转变，从而进一步巩固自身在航空领域的领先地位。

航空动力

（邵冬，中国航发研究院，工程师，从事航空发动机总体性能设计）



图6 利用VR技术进行齿轮箱模拟装配