

英国超高涵道比发动机技术发展路线图分析

Analysis to Ultra High Bypass Ratio Turbofan Engine Roadmap of ATI

■ 李明 / 中国航发研究院

2023年5月，英国罗罗公司在80号试车台完成“超扇”（UltraFan）发动机技术验证机的首次试车，且采用了100%可持续航空燃料（SAF）。应用了超高涵道比（UHBR）技术的“超扇”发动机的效率较遑达XWB发动机提高10%，这标志着英国在改善航空发动机效率、环保性等方面向前迈进一大步。

过去30年，大涵道比涡扇发动机极大地降低了飞机对环境的影响。2022年4月，英国航空航天技术研究院（ATI）在其2022年技术战略文件《零排放目标：通向2050的技术之路》确定了零碳排放飞机技术、超高效飞机技术和跨领域使能技术与基础设施等3个重点技术领域^[1]，为航空业确定实现2050净零排放所需的技术开发和潜在应用时间提供指导。超高效飞机技术中动力领域明确就是UHBR发动机技术，提出推进其技术成熟度（TRL）在2025年达到6，确保为新一代民用飞机从2030年开始投入使用做好准备。此前，ATI还公布了UHBR发动机的发展路线图^[2]，介绍了相关技术和与之相关的应用对象，以及这些技术背后的驱动因素。

超高涵道比发动机发展需求

航空发动机一直是英国航空业乃至整个国家创新发展的重要推动力，其研发和制造约占该行业直接经济活动产值的50%，且主要集中在宽体客机的大型大涵道比涡扇发动机。研制UHBR发动机是英国实现2050净零碳排放的重要手段，更是其保持发动机以下几方面技术优势的重要抓手。



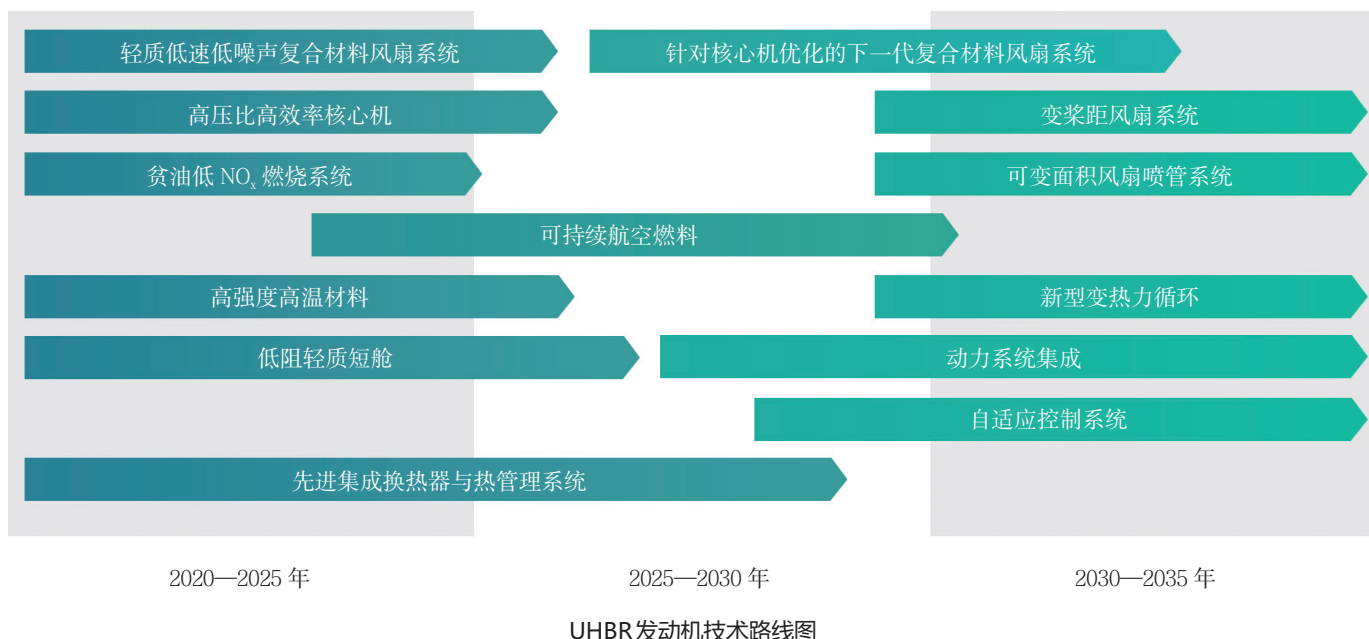
罗罗公司“超扇”技术验证机在80号试车台完成首次试车

一是降低成本，减少浪费，提高生产制造效率，以更好地利用资源和技术；二是提高能源效率，通过新型的架构设计提高推进效率；三是保护环境，减少CO₂、NO_x、非挥发性颗粒物（nvPM）、可感知噪声、材料使用与浪费；四是满足使用需求与灵活性、有韧性且可高效维护的推进和动力系统；五是改善乘客体验，降低舱内的感知噪声；六是提高安全性，包括损伤容限、异物侵入包容、可预测性和质量保证等。

超高涵道比发动机环境目标

对于重点的环保需求，英国对UHBR发动机提出了CO₂、NO_x和噪声等方面的量化阶段性目标。

CO₂方面，相比2000年基线，2025年排放降低20%，2035年降低25%；NO_x方面，相比2000年基线，参考CAEP/6标准，2025年降低55%，2035年降低65%；感知噪声方面，相比噪声标准，参考远程双发飞机的平均值，2025年累计降低30有效感知噪声分贝（EPNdB），2035年累



计降低36EPNdB。

超高涵道比发动机技术路线图

UHBR发动机采用复合材料、齿轮传动风扇系统，可实现高推进效率、高气动效率、低噪声，利用超高效高温高压核心机和智能监控系统，旨在到2030年实现10%以上的效率提升和CO₂排放降低，以及2030年后从混电和变桨距风扇等技术中获得更多收益。与此同时，需要克服轻质低噪声齿轮传动复合材料风扇、

高效多级涡轮、贫油低排放燃烧室、高强度高温材料等诸多技术挑战。

超高涵道比发动机关键技术体系

ATI针对路线图涉及的13类技术进行了关键技术分解，分别阐明各关键技术的使用对象及其发展的直接需求，即驱动因素。

轻质低速低噪声复合材料风扇

航空业一直致力于减轻部件质量以降低燃油消耗，碳纤维复合材料是理想的风扇系统材料，可使每架飞机

减轻700kg，相当于7名乘客及其行李的质量。更低成本的工艺和净零制造是该技术成功应用的关键，见表1。

高压比高效率核心机

高压比高效率核心机是实现高燃油效率、低排放和产品全生命周期成功的关键。所需的关键能力包括：先进合金和制造方法、高温密封方法和传感器，以及在役产品的新型维修和检测技术，见表2。

贫油低NO_x燃烧系统

UHBR发动机将采用先进的燃烧系统以减少排放和颗粒物的产生，

表1 轻质低速低噪声复合材料风扇技术分解

技术	应用对象	驱动因素
复合材料部件制造的先进方法，包括灌注、预成型、纤维铺放和相关工具	动叶、机匣、油箱、轴承支承、管、轴、环填料、静叶、安装座及支架等产品	降低部件的成本，减轻质量；提高强度和寿命
复合材料、金属材料的新修复和检测技术	风扇叶片、机匣、油箱、轴承支承、管、轴、环填料、静叶、安装座、支架、盘	增强对材料的了解；更快的修复过程；更好的部件可回收性
用于吸收和减轻噪声的声学技术	风扇叶片、机匣、进气道、隔声板和内衬	降低噪声幅值；噪声衰减
用于改进数据收集和监控的新型传感器	温度、振动监测、磨损、光子和光学传感器	提高诊断能力；嵌入式、低成本、智能
推进复合材料和金属的连接技术，包括焊接、黏合和机械方案	风扇叶片、机匣、油箱、轴承支承、管、轴、环填料、静叶、安装座、支架、盘	提高连接相似和不相似材料、零件集成的能力；提高维修性

同时使用未来的可持续航空燃料。新的流体控制机制将结合智能电驱和增材制造的流量装置来优化燃油输送。有效的持续运行需要能克服恶劣环境的低成本传感能力，以及改进的检测和维修技术等，见表3。

可持续航空燃料

生物燃料、合成燃料和氢燃料

都被视为未来可持续航空燃料。生物燃料和合成燃料的主要挑战分别是原料供应和成本，两者都只需要对燃气涡轮发动机进行很小程度的改变。氢燃料是实现零碳航空的另一条潜在途径，其主要挑战是配套基础供应设施建设。将氢燃料引入UHBR发动机需要在热力、燃料和燃

烧系统方面采取技术措施。可持续航空燃料相关技术分解见表4。

高强高温材料

UHBR发动机的减重、性能增强和工作温度升高推动了对先进材料和制造工艺的需求。研发更高强度、更高温度的复合材料和金属、黏合连接技术，以及更广泛地使用

表2 高压比高效率核心机技术分解

技术	应用对象	驱动因素
先进合金（包括钛、镍）	动叶、静叶、盘、鼓筒、轴、机匣	提高疲劳性能；增强连接性能；低成本、轻量化
优化近净成型产品的制造工艺（包括铸造、成型、锻造、机加工等）	动叶、静叶、盘、鼓筒、轴、机匣	快速制造、轻量化；模块化架构、集成架构
新型密封和轴承方案（包括非接触式、复合材料、空气、增材制造和磁性材料）	静密封和动密封、压力密封、刷式密封、O形圈、垫圈、防火密封件	耐更高温度能力；增强耐磨性；增强高压能力；减少维护
新型传感器（包括智能传感器、光学传感器和高温传感器）	用于测量速度、压力及振动监测的传感器	恶劣环境、耐更高温度能力；轻量化、低成本；智能通信；提高精度
复合材料和金属材料的新修复和检测技术	动叶、静叶、盘、鼓筒、轴、机匣	增强故障检测能力；低成本；更快的修复过程；提高部件寿命

表3 贫油低NO_x燃烧系统技术分解

技术	应用对象	驱动因素
新型维修和检测技术	火焰筒、瓦片、热障涂层、燃油喷嘴	增强故障检测能力；低成本；更快的修复过程；增强部件寿命
优化的燃油控制系统	燃油喷嘴、燃油总管、阀门、管、泵、燃油流量计	提高燃油供应与分级控制；减少燃油结焦；轻量化、低成本
新型传感器（包括智能传感器、光学传感器和高温传感器）	用于测量速度、压力、温度及振动监测的传感器	轻量化、低成本；提高诊断、智能通信；提高精度、耐恶劣环境
新型零部件的增材制造	燃油喷嘴、燃油总管、阀门、管	部件集成；轻量化、低成本；提高燃油控制
高温电驱动部件和相关控制系统	阀门、电磁阀	提高控制与调制；轻量化、低成本；取代液压机装置

表4 可持续航空燃料技术分解

技术	应用对象	驱动因素
SAF 掺混比例超高50%时，需要对飞机和发动机进行地面和飞行测试	研究并详细分析提高混合比对燃料、燃烧系统和发动机结构的影响；研究合成燃料和生物燃料产生的温室气体排放的基础知识	提高与航空煤油的混合比例，以降低CO ₂ 足迹
SAF 产品和过程的数字孪生，用于再现全生命周期性能	用于评估SAF产品全生命周期性能的标准通用方法	能够通过全生命周期分析评估燃料真实的可持续性
氢涡轮发动机的燃料、控制和燃烧系统	能够使用氢气或液氢的燃气涡轮发动机系统	零碳排放飞行；氢燃料生产

增材制造技术，可应用于各种核心件和外部件，见表5。

低阻轻质短舱

大型UHBR发动机的短舱对推进系统性能有重大影响。航空发动机运行的环境恶劣，需要低空气阻

力、轻量化部件的短舱，并采用降噪、热管理、防火安全和环境保护的技术，见表6。

先进集成换热器和热管理系统

未来UHBR发动机架构要求冷却滑油的热管理系统的性能、尺寸、

质量和成本得到进一步改善。氢燃料等可持续航空燃料的引入和一定程度的混电力，将给热管理系统带来进一步的技术挑战。一系列换热器需要提高技术，新的微型系统需集成到发动机中，见表7。

表5 高强高温材料技术分解

技术	应用对象	驱动因素
高温材料（包括金属和复合材料）	核心部件/系统、管、线束、油箱、泵、防火、防护屏、传感器	增强热端能力、增强防火能力；系统封装更靠近发动机核心；低成本
先进涂层系统（包括添加剂）	抗环境热障涂层；磨损性、疏水性、疏冰性	提高耐磨性、耐高温性、抗恶劣环境性能
传动系统用材料（包括金属和复合材料）	齿轮、变速箱、轴、润滑剂、轴承、密封件	更高承载能力；提高耐磨性、耐腐蚀性；轻量化
先进复合材料系统，包括陶瓷和金属基材料	密封件、动叶、隔热屏、旋转件、排气装置、盘、环、静叶	耐更高温度；提高耐磨性；轻量化；可回收再利用；提高连接性能
增材制造工艺和材料认证	换热器、流体控制、安装座/支架、燃油喷嘴、密封件	轻量化、低成本；增强零部件设计能力；可修复性；工艺过程友好的复合材料

表6 低阻轻质短舱技术分解

技术	应用对象	驱动因素
集成的结构优化工具	负载分担方案、安装方案	短舱与发动机安装得更紧密；结构件的优化；轻量化、低成本
先进的复合材料部件制造方法（包括灌注、预成型、纤维铺放和缠绕）	进气道、板、机匣、整流罩、反推、挂架、支架	轻量化、低成本、提高强度与寿命
用于噪声吸收和降低的声学技术（包括新材料）	进气道、板、机匣、整流罩、反推	降低噪声幅值、噪声衰减
热防护技术（包括新材料和冷却方案）	反推、板、作动器、流体输送	由于短舱和发动机安装更紧密，部件热负荷增加；低成本、增强性能
智能结构（包括变几何和综合健康管理）	进气道、板、机匣、整流罩、反推、挂架、支架	增强短舱的气动性能；提高诊断能力和智能通信

表7 先进集成换热器和热管理系统技术分解

技术	应用对象	驱动因素
紧凑型油冷和风冷系统	换热器和换热器的集成	产热增加；换热器安装位置从风扇到核心机匣
增材制造用于零部件的新颖设计	换热器	增强的拓扑优化；复杂的流程设计；低成本、快速制造；增强的可修复性
新型换热器安装（包括集成冷却、结构和气动等功能的部件）	气—滑油、燃油—滑油、微型系统	产热增加；换热器安装位置从风扇到核心机匣
冷却空气系统	气—气换热器、微型系统	总压比增大导致涡轮温度和最高温度升高；轻量化、低成本
先进热管理系统的模拟、测试和验证能力	针对新概念、新架构、测试设备设施开发的工具箱和模型	验证新概念热管理系统；增强散热和能量再利用

针对核心机优化的下一代复合材料风扇系统

大量部件，甚至承重件采用更先进的复合材料制造方法、智能结构，进一步减轻风扇系统的质量，见表8。

变桨距风扇系统

变桨距风扇可在发动机节流时调整风扇桨距，改善单位燃油消耗率（SFC），并可能省去对反推装置的需求，应用的对象将是2030年以后的UHBR发动机。这一概念的使能要素包括作动器、控制和监测技

术、智能结构及模拟工具，见表9。

可变面积风扇喷管系统

可变面积风扇喷管（VAFN）能够调节风扇喷口面积以匹配发动机运行，并带来降低燃油消耗和噪声等收益，适用于2030年后的UHBR发动机，需要开发驱动、密封、监控和智能结构等技术，见表10。

新型变热力循环

复杂的工作循环，如换热循环（级间冷却和回热）和末端循环（废热转化为动力），可以在2035年后应用，进一步提高发动机的循环热效率。

短期内需要进行可行性研究，以引导技术开发和系统验证，见表11。

动力系统的集成

为充分发挥大型UHBR发动机的性能优势，需要提高部件和系统的集成度，包括跨传统组装边界的部件。先进架构将挑战实体和功能接口，并充分利用完善的模拟、先进材料和新型制造和装配技术，见表12。

自适应控制系统

未来的控制系统需要灵活性，以适应来自飞机系统和部件的大量

表8 针对核心机优化的下一代复合材料风扇系统技术分解

技术	应用对象	驱动因素
先进的复合材料部件制造方法（包括灌注、预成型、纤维铺设及相关工具）	动叶、机匣、油箱、轴承支承、管、轴、环填料、静叶、安装座、支架	减少部件成本和质量；提高强度和寿命
复合材料承重件	结构件、机匣、静叶、轴承支承、支板	轻量化
智能结构（包括变几何和综合健康管理）	动叶、机匣、油箱、轴承支承、管、轴、环填料、静叶、安装座、支架	智能、自适应、可重构的结构以适应环境；增强感知和决策能力

表9 变桨距风扇系统技术分解

技术	应用对象	驱动因素
智能结构（包括变几何和综合健康管理）	风扇叶片、机匣、密封件	智能、自适应、可重构的结构以适应环境；增强感知和决策能力
变桨距的模拟与集成工具	模型、分析工具、敏感性分析、结构和流动分析	提高对约束和技术评估的了解掌握；取消反推
驱动和桨距控制技术	作动器、系统模型	提高控制和调制；故障模式评估；系统可靠性；物理约束

表10 可变面积风扇喷管系统技术分解

技术	应用对象	驱动因素
驱动技术（包括电动、气动、液压）	作动器、系统模型	提高控制和调制；增强感知和决策能力
新概念气动密封	静/动密封、压力密封、刷式密封；O形圈、垫圈、防护密封件	提高可靠性、可修复性；轻量化；最大限度减少泄露
智能结构（包括变几何和综合健康管理）	喷嘴结构、密封件	智能、自适应、可重构的结构以适应环境；增强感知和决策能力

表11 新型变热力循环技术分解

技术	应用对象	驱动因素
平台级热管理系统将分散、低品级的热量回收入推进循环	系统验证、热回收装置、能量管理系统	提高的热能再利用和热管理需求
新循环的可行性评估（包括中间冷却和回热循环涉及部件和系统的性能评估）	采用先进循环的可行性研究	提高飞机层面的能源效率

表12 动力系统的集成技术分解

技术	应用对象	驱动因素
发动机上的集成系统	油箱、控制单元、电缆、线束、换热器、泵、管	增强集成，采用模块式系统；提高维修性、系统可操作性
用于优化系统集成的工具箱	用于结构、热、气动、声学、机械和电气等分析的模型和工具	在供应商和原始设备制造商间更多的协作
新型零部件的安装方案	支架、安装系统	增强集成，采用模块式系统；提高维修性、隔振、系统可操作性

表13 自适应控制系统技术分解

技术	应用对象	驱动因素
先进的布线/束线和连接器	连接器、底壳、电缆、接线、继电器、接触器	嵌入式线束、提高数据传输能力；轻量化、无线连接器；快速制造、高温电缆；小型化、模块化连接器
新型防冰系统	电加热器、电驱系统、热部件、涂层	减少电力和能量消耗；轻量化、环保；加深对结冰现象的了解
新型传感器（包括智能传感器、光学传感器、高温传感器）	用于测速度、压力、温度及振动监测的传感器	轻量化、低成本；提高诊断、智能通信；提高精度、抗恶劣环境能力
先进的综合健康管理技术	控制器、监控单元、流体运输、电力、通信、保护系统	自诊断和预测系统，包括寿命使用监测系统；来自多个传感器的数据融合和基于模型的信息
智能部件控制机制	高带宽驱动系统；流量阀、电磁阀、智能静叶	增强可靠性；提高控制和决策能力

数据。在增强可靠性、提高效率 and 减轻质量等需求的推动下，智能传感器、综合健康管理和智能作动器控制等技术将促进新产品的开发，包括微型连接器、新型防冰方案、智能叶片和先进控制器，见表13。

结束语

航空业对更安全、更安静、更洁净和更经济飞行的需求不断增长，超高涵道比发动机是满足这些需求的主要可行方案之一，也是当前大推力民用航空发动机的重要发展方向。

超高涵道比发动机涉及的关键技术广泛，其研制不但能促进整个航空发动机行业的多种先进技术成熟，更能带动整个发动机产业链的升级换代，能对航空业甚至国民经济发展发挥较大的溢出效应。英国超高涵道比发动机的技术体系和路线图对各国开展相关研究具有一定参考意义。

航空动力

（李明，中国航发研究院，高级工程师，主要从事航空发动机科技情报及发展战略研究）

参考文献

- [1] Aerospace Technology Institute (ATI). Destination zero: the technology journey to 2050 [R/OL]. [2022-04] (2023-09-08). <https://www.ati.org.uk/wp-content/uploads/2022/04/ATI-Tech-Strategy-2022-Destination-Zero.pdf>.
- [2] Aerospace Technology Institute (ATI). Propulsion & power: UHBR engine roadmap[R/OL].[2021-08](2023-09-08). <https://www.ati.org.uk/wp-content/uploads/2021/08/UHBR-Engine-roadmap-ATI.pdf>.