

下一代战斗机动力装置发展进入新阶段

Powerplants of Next Generation Fighters Entering a New Phase

■ 李明 / 中国航发研究院 李炎 / 中国航发动研所

战斗机发动机是航空动力技术的制高点。下一代战斗机的动力装置或将采用变循环技术，并在关注传统的推力指标的同时，将更加重视包括大功率提取、电气化、整机冷却等综合能量管理能力，并兼顾燃油经济性。

新年伊始，美欧纷纷公布了下一代战斗机动力的最新进展及未来重点。美国启动F-35A换装自适应发动机项目的前期调研，英国与日本确定合作研发各自下一代战斗机动力的验证机，法国与德国完成“未来作战航空系统”(FCAS)动力的关键技术测试。种种迹象表明，下一代战斗机动力的发展已进入实质阶段。



美国下一代战斗机概念

美国启动F-35A换装自适应发动机调研

2022年1月27日，美国国防部、空军、空军物资司令部(AFMC)、空军全生命周期管理中心(AFLCMC)、推进采购部(LPA)联合发布信息征询书(RFI)，面向全球工业界开展关于“F-35换装自适应发动机”(FAER)项目的市场调研，要求各方在2月28日前提交反馈信息，并表示这将有助于确定市场提供完整推进系统(如发动机和相关部件)的能力。推进系统可以完全集成到F-35A中，并满足推进系统和飞机生产交付的时间表。FAER项目的目标是完成自适应发动机过渡项目(AETP)的工程与制造发展(EMD)阶段。虽然官方宣称征询书仅用于规划目的，但此举标志着这项已开展15年、耗资40亿美元的

旨在为战斗机配装三涵道架构自适应发动机的项目又前进了一步。

项目调研内容

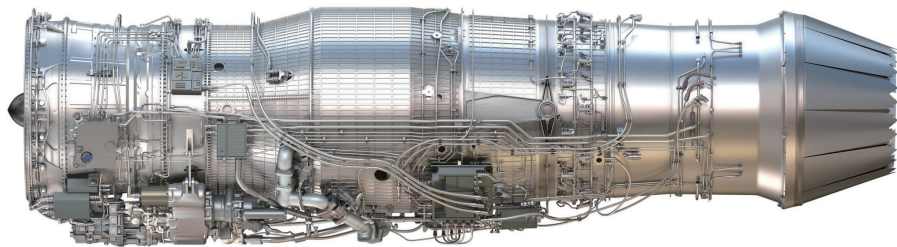
FAER项目调研内容主要包括企业基本信息、项目实施计划、飞行试验、合同授予事项、风险分析、维修保障及未来工作等7方面，共计25类问题，需要企业答复，综合归纳如下。

一是企业基本信息。企业名称、地址、联系方式、近期相关经验，计划合作和分包安排及以往与其合作经历，企业性质、规模，本土还是外国企业。

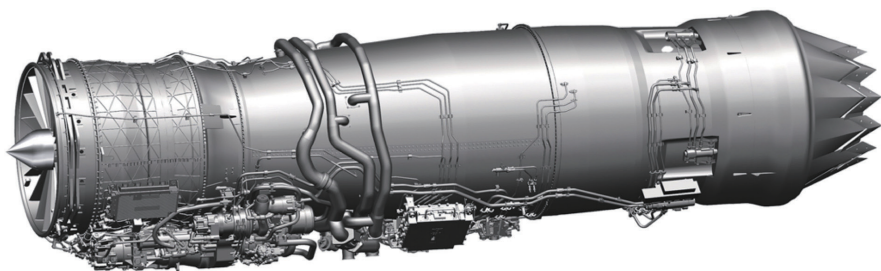
二是项目实施计划。计划内容包括：在进入2028财年低速率初始生产(LRIP)前，FAER项目需要完

成哪些零部件级、整机级的地面和飞行试验；其中地面试验需要多少台发动机；如何处理完成试验所需的大量材料；若在合同授出10个月内，开展全尺寸发动机的关键设计评审(CDR)，存在哪些限制因素；FAER项目中5项最重要的成本要素是什么，企业如何降低成本；为达到项目要求，推进系统要应用在F-35A，企业打算采用哪种自适应推进系统；介绍发动机使用和维护需要的特殊支撑设备、特殊工具及其他任何支撑物品，阐明支撑设备的类型和数量。

三是飞行试验。完成FAER项目需要多少台发动机、多少架飞机、开展多少架次试验；在FAER项目进



GE公司的自适应发动机验证机XA100



普惠公司的自适应发动机验证机XA101

入低速率初始生产前，预期包含多少平台集成，如硬件或软件接口；为确保FAER项目在2028财年进入低速率初始生产，需要解决哪些发动机技术风险；为确保FAER项目在2029财年前准备好生产，增材制造领域需要哪些成熟技术。

四是合同授予事项。建议FAER项目采用哪种合同以及原因，建议何种激励以及衡量标准；FAER作为一个保密的项目，这意味着什么；对价格选项有何提议；企业的生产线能力是否能满足要求，如果满足要求，是否存在限制因素；企业与F-35主承包商洛克希德-马丁（洛马）公司合作的经验或关系。

五是风险分析。是否准备好能在2024财年第一季度签署合同，包括人员、能力、设施、设备等方面；FAER项目能否加速到5年以内，如果可以，存在哪些风险；发动机的海平面试验和高空试验，需要哪些设施及能力。

六是维护保障。为FAER项目制订的未来维护方案，支撑两级或三级维修策略，包括建立集中式中间维修设施（CIRF）是否存在挑战；在低速率初始生产之前，有无规划活动执行，确保选定的方案能在需要时就绪。

七是未来工作。企业在供应商基础方面是否存在影响FAER项目的挑战。

项目关键节点

根据信息征询书可知，该项目被确定为保密项目，合同将在2024财年第一季度授出，自适应发动机将在2028财年进入LRIP，企业要确保在2029财年做好生产准备。虽然征询书是全球公开发布，但其目标对象就是前期一直从事自适应发动机技术研究的两家本国企业——GE公司和普惠公司。

项目分析

F135虽是当前在役的最先进的战斗机发动机，截至2022年1月已

生产900多台，配套750多架F-35，但一直受设计问题、备件短缺以及维修能力不足等诸事困扰，导致F-35停飞事件时有发生，如2021年9月美国空军的46架F-35A停飞。此外，围绕近期一系列F-35坠毁的争议，美国军方还必须解决安全问题，发动机升级似乎也成为其中的一部分。美国国防部希望在降低F-35的发动机成本的同时支持最新的第4批次升级，能携带更多有效载荷和武器以及更先进的传感器和电子设备，这需要提高发动机的推力、功率提取及热管理能力，而当前使用的F135发动机难以满足需求。根据会议版2022年国防授权法案（NDAA）描述，美国国会要求从2027年开始在当前和未来的F-35上安装新发动机，并要求空军与国防部联合对此制订一项计划。其中，F-35A采用AETP发动机；而F-35B和F-35C是采用AETP的衍生型还是普惠公司一直推崇的F135“增强型发动机套件”（EEP），仍持开放态度。

FAER旨在完成AETP的工程与制造发展（EMD）。AETP建立在前期“自适应通用发动机技术”（ADVENT）计划、自适应发动机技术发展（AETD）项目等系列技术工作基础上，目标是在2017—2022年完成自适应发动机工程验证机的详细设计、制造和试验评估。与F135发动机相比，AETP发动机的燃油效率提高25%，净推力增大5%，加力推力增大10%，航程延长30%，热管理能力显著提升，满足未来战斗机上新型传感器和定向能武器的巨大功率需求。

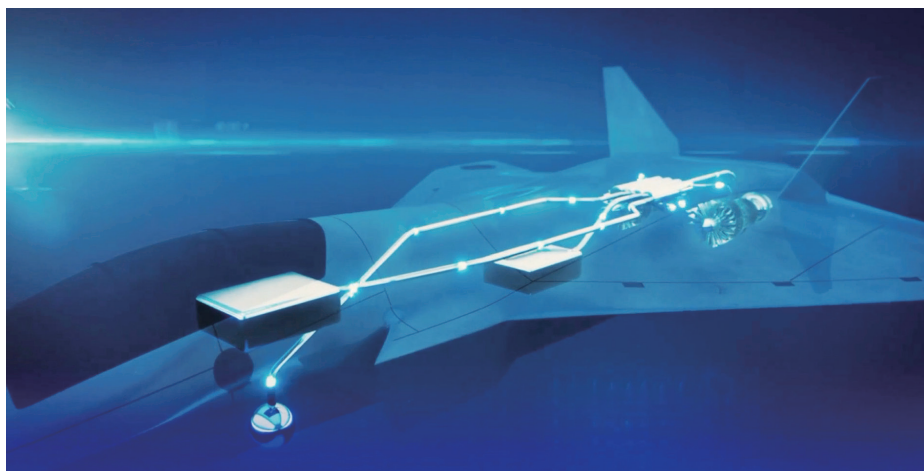
AETP由GE公司和普惠公司

各自承担，分别研制名为XA100、XA101的验证机，合同金额分别为9.2亿美元和8.7亿美元。GE公司在2019年2月完成XA100详细设计；2021年5月完成首台XA100高空台测试，达到所有测试目标并超出预期；同年8月开始第二台的测试，并于12月完成了第一阶段测试，第二阶段测试将于2022年第一季度在美国空军阿诺德工程发展中心（AEDC）进行。普惠公司在2019年9月完成XA101的详细设计评审，2021年开展了首台XA101的测试工作。两型验证机已经通过数字适配的方式与F-35进行了集成测试，美国空军计划在2022财年初开始测试AETP的原型机。

AETP预计将在2022年完成，FAER项目可认为是AETP的后续，借此持续推动自适应技术的成熟，预计AETP发动机将于2027—2029年开始配装F-35A，这也是技术发展的使然，是技术成果转化应用的一种方式。

英日联合研发下一代战斗机发动机验证机

2021年12月，英国罗罗公司宣布将与日本石川岛播磨重工（IHI）联合开发和交付未来的战斗机发动机演示验证机，预计于2022年年初正式启动。两公司将在2026年之前一直致力于验证机开发，届时再做出有关进入完整开发计划的关键决定。该项目发展的发动机可能将是两国未来战斗机的唯一动力。英国曾在2018年启动下一代战斗机“暴风”项目，计划在2025年开始验证机试飞，2035年前后交付英国皇家空军，2040年取代退役的“台风”战斗机。日本在2020年确定开发下一代战斗



“暴风”战斗机的动力与推进系统

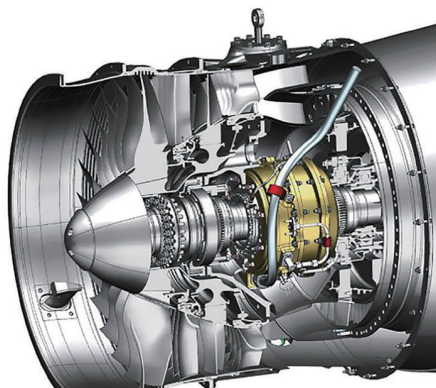
机F-X，计划2024年开始制造原型机，2028年左右首飞，2031年批量生产，2035年起正式列装服役。

项目特点及分工

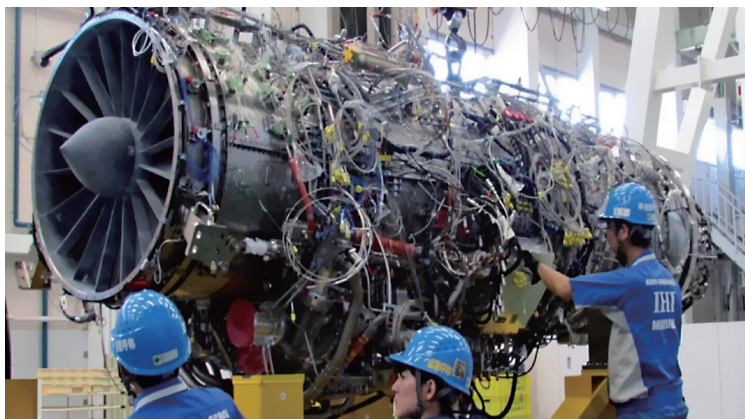
虽然两家公司没有透露发动机将采用什么方案，但验证机的工作将集中在推进与动力/电力的联合应用。关键是能为飞机任务系统和传感器的运行提供大量电力，甚至为使用定向能武器铺平道路。预计这两型飞机都将采用隐身技术，发动机势必会被深埋在飞机中，要求发动机体积更小但推力更大，能在更高的温度下运行，需要先进的材料技术和热管理能力；也可能采用推力矢量技术。验证机将结合英国“未

来作战航空系统技术倡议”（FCAS TI）开发的技术和IHI公司的XF9-1试验型发动机验证的技术。

罗罗公司为支持FCAS TI而开发和测试的发动机技术中，目前只公开了“嵌入式起动机发电机”（E2SG）技术，并在阿杜尔（Adour）发动机上开展了试验。罗罗公司将试验新的数字设计工具和先进制造工艺，以加快开发速度，优化开发时间和成本，并表示这些方法可以将新组件的设计从几个月或几年缩短至几周。罗罗公司已经证明其可以在5年内开发出新型商用发动机的能力，并有信心在军用发动机领域也能做到这点。对于是否采用自适应技术，



嵌入式起动机发电机



XF9-1发动机和新一代战斗机F-X

罗罗公司表示提供变循环能力“有多种形式”，公司也正在继续探索。

IHI自2018年以来一直在测试其新型大推力军用航空动力XF9-1原型机，包括地面测试和高空台测试。该发动机推力108kN，加力推力147kN，涡轮前最高温度1800℃，长度4.8m，直径1m。从典型指标看，其性能与普惠公司的F119发动机相当，而体积相对较小，较小的发动机体积意味着更多的燃油空间或更大的有效载荷舱以实现战斗持久性。IHI一直在发展推力矢量喷管技术，还在开发可嵌入航空发动机的大功率电机，并在2020年的地面测试中达到了250kW的额定输出。

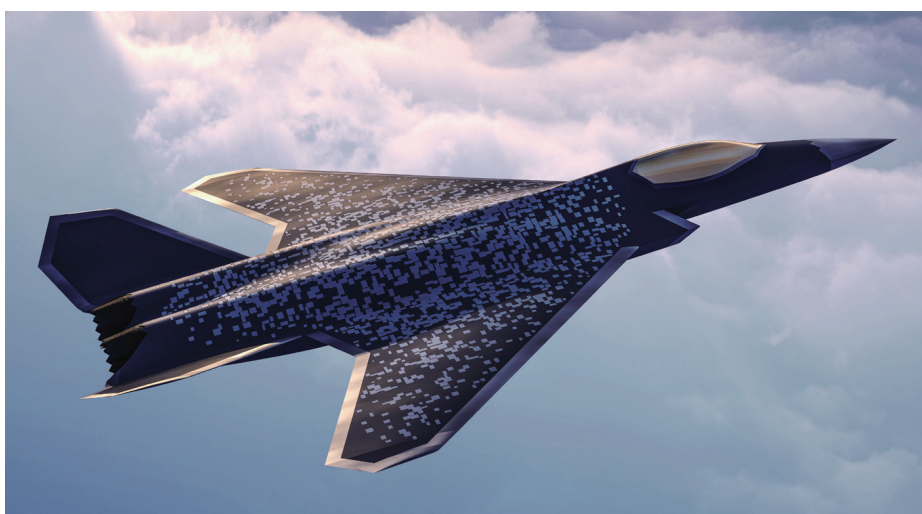
XF9-1是日本航空业的历史性突破，集成了日本过去几十年培育的先进航空发动机技术，提高了其在整机研制方面的能力。罗罗公司也表示XF9-1具有可以加入到新验证机项目的能力。同时，日本在材料方面的突出能力也得到了罗罗公司的认可，尤其是在陶瓷基复合材料、耐热高温合金和发动机电子设备的开发。

项目分析

虽然英日两国的未来战斗机平

台对航程、速度的要求不尽相同，但使用相同的动力装置在技术上是可行的。早在20世纪80年代，两公司就共同参与了大型民用涡扇发动机V2500的开发和生产。自2020年以来，两国一直在探索如何合作，形成技术互补。项目如果成功，“暴风”和F-X两型战斗机通用的动力装置可节省数亿美元成本。此次合作意味着英国转向亚太地区，以及日本将其防务合作关系扩大到传统盟友美国之外。

法德“未来作战航空系统”



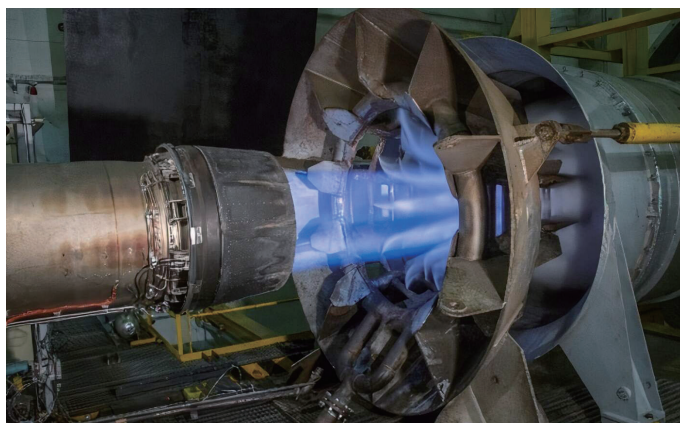
欧洲下一代战斗机

发动机开展关键技术研究

2022年1月10日，法国国防部武器装备局（DGA）宣布对下一代欧洲战斗机发动机（NEFE）技术开展了重大测试，支撑未来作战航空系统（FCAS / SCAF）项目战斗机的动力开发。未来作战航空系统项目于2019年启动的前瞻性系统，由法国、德国和西班牙联合开展并由DGA主承包，计划于2035年首飞，2040年投入使用，旨在取代这些国家当前使用的战斗机，满足未来空中优势需求，其核心包括下一代战斗机（NGF）。NGF预计将是一种大型双



Turenne项目开发的高压涡轮



集成了新型高压涡轮的原型机在DGA试验台上测试

发隐身战斗机，约30t，能够介入竞争激烈的空域，夺得制空权以确保空中优势，需要时可投放核武器。NGF的演示验证机采用M88发动机的改进型，由法国赛峰集团与德国MTU公司新组建的欧洲军用发动机团队（EUMET）负责研制，西班牙ITP公司作为EUMET的主要合作伙伴参与。赛峰集团负责整体设计集成和热端部件开发；MTU公司负责冷端部件，并提供维护、修理和大修（MRO）服务；ITP公司负责开发低压涡轮和喷管等工作。

动力分析

NEFE发动机结构更加紧凑、质量更轻，推力约120kN，涡轮前温度可能达到1827℃，预计还会采用变循环技术，目标是在超声速下保持高推力并减少低空巡航时的油耗，同时第三涵道气流还能为航电设备提供额外的冷却。发动机将采用矢量喷管，便于飞机操纵；还会探索混合电推进技术以进行机载能量管理。对现代战斗机而言，航电设备及系统冷却的功率和热/能量管理可能比推力更重要。

项目进展

较高的涡轮前温度对发动机至

关重要，DGA在2015年启动涡轮叶片研究（Turenne）项目，包含两个阶段，由赛峰集团开展，拟到2025年使涡轮前温度比“阵风”战斗机用M88发动机提升250℃。赛峰集团计划于2027年在改进型M88发动机上验证相关技术。

第一阶段持续了5年，开展新涡轮的现代流程设计、数字化试验以及生产制造，包括可扩展的数字模型、三维数值模拟、数字化设计的新型金属合金，并使用3D打印样件，还获得了国际专利。

第二阶段从2019年开始，赛峰集团被授予1.3亿美元，高压涡轮被集成至M88发动机。测试中使用热敏涂料示温技术，将实际高压涡轮叶片热谱图与第一阶段数值模拟结果进行对比。之后发动机将在DGA的推进试验台上进行数月的耐久性测试，目的是对这些新涡轮叶片实施加速老化，以验证其使用寿命及其在长时间内保持高性能运行的能力。

2021年，法国国防部还启动了加速开发用于新涡轮的合金和多层材料系统（ADAMANT）研究项目，由DGA与法国国家航空航天研究院

（ONERA）和赛峰集团合作开展，目的是研发用于涡轮叶片和涡轮盘的新一代耐高温金属材料和陶瓷基复合材料。

结束语

美国在新一代战斗机动力方面的发展可谓一骑绝尘，自适应发动机即将进入工程与制造发展阶段，本世纪20年代末大概率会拥有自适应的XA100、XA101和加强版的F135，可能会引起未来的战斗机作战方式的变革。欧洲在大型航空装备研发上有联合的传统，主要考虑技术难度和未来市场等综合因素，法德两国珠联璧合，确定了下一代动力的发展路线，并完成了部分关键技术的研究验证。脱欧后的英国更加特立独行，但一直将航空动力技术视为看家本领、引领本国未来繁荣的关键，罗罗公司的出口值能占全国的2%，公司业务占全国GDP的0.6%，下一代动力无疑是其发展的重中之重，与日本联合则属锦上添花，意在出口市场。

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发展战略与科技情报研究）