

美国新一代国家级军用航空动力预研计划分析

Analysis of U.S. New Generation Military Aeronautical Propulsion Research Program

■ 晏武英/中国航发研究院

未来10年，美国空军最高优先级的动力预研目标是发展具有颠覆性的技术，以大幅改善未来战斗机、直升机、高超声速导弹和无人机的能量管理和发动机性能。为此，美国空军将启动新的国家级军用航空动力预研计划，以降低下一代航空发动机研发、生产和保障成本，提高燃油效率和推进能力。

美 国新的国家级航空动力预研计划称为“支持经济可承受任务的先进涡轮发动机技术”(ATTAM)计划，它是“综合高性能涡轮发动机技术”(IHPTET)计划和“通用经济可承受先进涡轮发动机”(VAATE)计划的后继项目。该计划最早于2016年6月25日举行的美国航空航天学会(AIAA)“推进与能源系统需求”研讨会上，由美国空军研究实验室(AFRL)披露，并在2017年5月召开了针对该计划第一阶段的预征询会议，向有意投标的美国企业进行了项目说明和一对一咨询。同年11月7日，AFRL发布了ATTAM计划第一阶段跨部门公告(BAA)草案，经过修改的正式公告于2018年1月30日发出，并分别于1月31日和2月9日对部分附录进行了修订。整个项目的投标截止日期是2018年3月30日，预计会在年内正式开始实施。

ATTAM计划启动的背景

VAATE计划于2005年全面启动，旨在到2017年发展出具有革命性、创新性的技术，使涡轮推进的经济可

VAATE计划第三阶段合同授出情况

公司	合同金额/亿美元	合同起止时间	启动经费/万美元
GE公司	3.25	2015.01.20—2023.01.27	45.1400
普惠公司	3.25	2015.04.28—2023.04.27	42.1000
罗罗北美技术公司	1.00	2015.06.24—2023.06.23	14.5163
佛罗里达涡轮技术公司	0.20	2014.09.11—2022.09.22	15.0000
霍尼韦尔国际公司	0.75	2015.01.28—2023.01.23	15.0000
诺格系统公司	0.30	2015.02.24—2023.02.23	15.0000
波音公司	0.30	2015.03.12—2023.03.12	10.6502
合计	9.05	8年	157.4065

承受能力相比2000年的基准发动机提高10倍。该计划分为三个阶段，分别达到经济可承受能力提高4倍(2009年)、6倍(2013年)和10倍(2017年)，技术成熟度和制造成熟度达到6级的目标。该计划第一阶段按时完成，第二阶段在2009年启动，但研发工作有所拖延，导致第三阶段大部分合同到2015年年初才启动。第三阶段合同针对国防部部长办公室提出的打击/持续介入、多任务机动、持续“指挥、控制、情报、监视与侦察”(C2ISR)、快速空间进入、敏捷战斗支援/系统和平台

使能、空中优势/防护等6个平台能力需求，共开展了11个领域的研究，包括自适应循环技术成熟、先进能量和持续保障技术、先进燃料、先进综合控制、先进推进一体化、高效亚声速和超声速可消耗发动机、综合电力和热管理、无人机发动机、可重复使用高马赫数涡轮发动机、2035年技术概念、极高效发动机等。VAATE计划第三阶段共收到34份投标书，最终选择了其中7家公司，授出的合同金额总计9.05亿美元，时间均为8年，最终将在2023年全部结束。

VAATE的子计划中,“通用自适应发动机技术”(ADVANT)和“先进经济可承受涡轮发动机”(AATE)已经基本完成,并过渡到了型号研制阶段;瞄准先进大功率涡轴发动机技术的“未来经济可承受涡轮发动机”(FATE)已经实现整机试验,计划2020年转入工程研制,而“高效嵌入式涡轮发动机”(HEETE)项目进展缓慢,预计到2019年才能实现整机试车。美国军方在以第六代战斗机为主的下一代航空装备论证过程中,逐渐形成了新的动力需求,特别是在综合推进、动力和热管理方面,现有的VAATE计划无法满足到2030年实现作战能力的要求。美国军方已经在机电领域启动了“兆瓦级战术飞机”(MOA)、“下一代热、电力与控制”(NGT-PAC)等研究计划,亟须航空动力技术的同步跟进,这也促成了在VAATE计划尚未结束的情况下,提早开始了ATTAM计划研究工作。

ATTAM计划主要研究领域

与VAATE计划相同,ATTAM计划也由美国国防部、国家航空航天局(NASA)、能源部、联邦航空局(FAA)和工业界联合实施,AFRL航空航天系统部负责管理。其目的是寻求用于下一代涡轴和战斗机发动机的先进基础技术和先进部件,并通过部件、核心机及验证机试验来评估和确认这些技术是否达到技术成熟度(TRL)6级或制造成熟度(MRL)6级。

ATTAM计划研究内容除先进推进技术外,还首次纳入了完整的综合动力与热管理要素,以满足未来发动机支撑更多电力系统、定向能武器、功率更大的传感器等需求,



机载激光武器

同时提高推进效率和飞行器自身的动力水平。第一阶段将持续到2026年,任务是研发先进涡轮推进、动力与热技术,并开展演示验证及转化,涵盖大量现有的、新涌现的及未来的多种军用平台推进、动力和热技术需求,目标是将不同类型航空发动机的燃油效率提高10%~30%,电力和热管理能力提高2~20倍,推进效率提升10%~25%。第一阶段将在6个主要领域寻求基础与应用研究招标。

推进、动力与热技术

研发能提供高发电和热管理功能的一体化先进推进能力技术,为宽广范围级别的发动机提供革命性能力。主要领域包括自适应核心机和发动机结构、子系统设计优化、部件与系统技术、先进材料、发动机稳定性、电力、热管理,以及预测与健康管理的(PHM)。

自适应推进技术 用于自适应循环核心机和验证机设计和研制的技术,通过部件试验使技术成熟度/制造成熟度达到为核心机和验证机试验做好准备的程度。研究内容包括自适应循环发动机技术、可操作

性、动力与热管理;先进材料和制造系统的创新应用。

综合推进、动力与热管理(INPPAT)演示验证 用于先进涡轮发动机架构集成和控制的技术,研究内容包括用于先进亚/超声速飞行器概念的推进、动力与热管理系统研发、集成和控制。通过部件设计研发和风险降低试验,实现系统集成验证。重点领域包括权衡控制部件研发、控制寿命管理建模、自适应发动机结构,以及武器系统集成性能与可操作性。

先进推进、动力与热系统控制 用于未来飞行平台能力实现的硬件研发和集成技术,研究领域包括用于控制、动力、作动和传感的电子器件,预测与健康管理的,以及先进材料与制造系统的创新应用。

用于集成系统的热技术 用于热管理系统研发和集成的技术,覆盖将要应用的所有级别推进系统,重点领域包括用于推进和飞行器系统的动力与热管理需求,先进材料和制造系统的创新应用,以及提高TRL/MRL的部件开发和风险降低试验,从而为系统集成验证做准备。

发动机概念的系统探索 (SEEC) 研究将先进推进、动力与热管理系统集成入未来飞行器系统的技术,开展系统概念设计,规划航空推进/动力/热管理架构,确定相关技术、制造和集成难点。重点领域包括建立和评估关键使用效能、系统级性能矩阵、技术和制造成熟度水平,以及开展技术组合研发和投资策略的案例分析。

中小尺寸推进技术

用于中小尺寸推进系统的创新构型研发和验证的技术,包括推力/功率不大于89 kN或7350 kW的涡轴、涡喷和涡扇发动机。这些技术应当能改善发动机在宽广飞行条件范围和马赫数下的性能和可操作性,满足飞行器及推进系统的动力和热管理需要,满足用于时间敏感目标或增程和/或巡飞任务的特殊需求。

高效小尺寸推进 (ESSP) 研发用于可重复使用小型发动机(推力/功率不大于4450N/1000shp)的创新技术和构型,能够改善发动机性能、

效率、可操作性和耐久性。重点领域包括先进核心机技术,先进机械系统,以及用于改善耐久性、降低全生命周期成本的先进材料/涂层。

高效中等尺寸推进 (EMSP) 用于高效推进系统研发和验证的技术,能够使作战飞机在具备综合动力与热系统能力的同时提高载荷/航程/巡航时间。重点领域包括创新功率提取,提高推重比或功重比的创新循环,创新飞机/发动机构型,综合推进、动力与热需求的一体化飞机和发动机设计,能提高发动机性能的先进材料、涂层和制造工艺,改善部件效率以降低耗油率,以及降低采办和全生命周期成本的技术。

亚声速可消耗涡轮发动机 用于亚声速特定任务寿命系统研发和验证的技术,从而降低发动机成本、扩大任务需求与成本的权衡空间,并高效满足所需的性能、可靠性和寿命。重点领域包括能够减少维修的创新途径,创新应用材料、涂层和制造方法以降低成本,在降低成

本的同时提高性能的创新途径。

超声速可消耗涡轮发动机 研发和演示用于超声速系统的技术,将聚焦能为高马赫数用途提供高效推进能力的创新构型技术。重点领域包括创新热管理系统和推进构型,涡轮-冲压组合发动机,高效进气道和尾喷管一体化,材料、涂层的创新应用,先进润滑和机械系统,先进材料和制造。合同商应研发能满足军方重点任务的先进概念设计,确定经济可承受任务权衡空间和转化策略,并通过部件/系统设计和试验促使关键技术成熟。

保障与经济可承受技术

研发能够使现有、新研及未来航空平台在具备适用性的同时改善经济可承受性、可用性并提高作战效能的通用技术。除了更加环境友好,这些技术还要满足对更高效的成本-效益设计方法和预测能力的需要,从而获得更好的部件/系统性能、可操作性、耐久性、诊断与预测,以及先进燃油和润滑等。这些技术应当通过分析和/或部件、核心机及验证机试验进行演示和验证。

先进发动机保障技术 (AEST)

研发与现有、新研及未来发动机系统安全性、耐久性和降低保障成本相关的技术。重点领域包括改善部件效率、部件和涂层耐久性、减轻重量(质量)的技术,基于物理建模,概率设计方法,转子动力学,预测与健康管理的先进材料和工艺设计方法,用于制造和材料衰减等场景的无损评价/检测能力,多模交互作用,先进检测设备,以及能够使部件/系统达到特定循环寿命的高置信度设计方法。

加力设计系统 (ADS) 用于下一代加力系统研发和演示的技术,包



可消耗无人机概念图

括能改善现有加力燃烧室和研发创新系统构型的技术。形成能够支持和验证设计方法和模型的诊断和试验能力，扩展使用包线并保持燃烧效率。

战场燃料 (BF) 用于先进燃料系统及部件研发和演示的技术，能够使推进系统性能和平台能量管理领先一代。重点领域包括改善喷气燃料热稳定性的技术，能够适应燃料化学成分和热动力特性存在不确定性的燃料热管理系统设计和维修与保障能力，用于高度一体化推进、动力与热系统状态预警和主动控制的燃料健康状况主动监测，提高用于高马赫数平台的燃料热沉能力，提高用于大航程、有限体积飞行器的燃料体积能量密度，能降低维修成本和确保任务准备度的生物污染防止与机上处理。

喷气噪声降低 (JNR) 研发和演示基于物理的先进分析方法技术，能够对喷气噪声产生的根本机理提供更好的原理解读，并提出控制方案。研发能降低喷气噪声的技术，并通过分析和试验进行演示验证。

创新构型和技术

研发和演示创新的飞机推进构型和技术，实现综合推进、动力与热能力的跃升。重点领域包括能够显著改善热效率和推进效率、降低系统级成本、缩短抵达目标时间，以及提高动力/热管理能力的革命性技术。

高马赫数涡轮发动机 研发用于高马赫数飞行的可重复使用涡轮发动机使能技术。重点领域包括能够改善总体性能、可操作性和系统集成度的创新构型和部件，创新热管理，先进材料和制造，先进机械系统、燃料及润滑。

增压燃烧 研发和演示可将增压燃烧引入主推进和加速推进装置、主燃烧室及发电等所需的技术。重点领域包括燃烧系统总压增加技术，并演示系统效率提升。

涡轮-电推进 能使高效涡轮-电推进与相应军用平台兼容的技术。重点领域包括涡轮-电推进，混合电推进，可靠的混合控制，高效电力分配。

极高效发动机 研发和演示与极高热效率和推进效率相关的技术。重点领域包括高压比压缩系统，综合动力与热管理，创新自适应循环构型，轴承寿命改善模型，先进材料/制造系统。

2040年后技术概念 识别和评估可在2040年后开展演示验证的候选技术。重点领域包括加深对用户需求的理解，远景飞行器系统的概念设计和分析，下一代航空推进构型的设计和评价，革命性、颠覆性技术的技术成熟度、制造成熟度及其他关键参数的评估和规划，支撑技术投资策略的业务案例分析 (BCA)，应用系统工程方法协助技术组合开发。特定推进研究方向包括先进部件技术，革命性燃料来源，增压燃烧，先进材料。

材料与制造技术

材料研究是一项用于新型推进系统设计、研发和试验的使能技术，而且涵盖本计划的所有重大挑战领域。材料和制造技术的关键研究领域包括新型创新性材料和涂层，用于材料制备、损伤演变预测的基于物理的工具、不同尺寸下的特性、真实使用条件下先进材料寿命等优化建模和方针工具的开发、验证与确认，先进制造方法，计算材料学及材料特性研究。

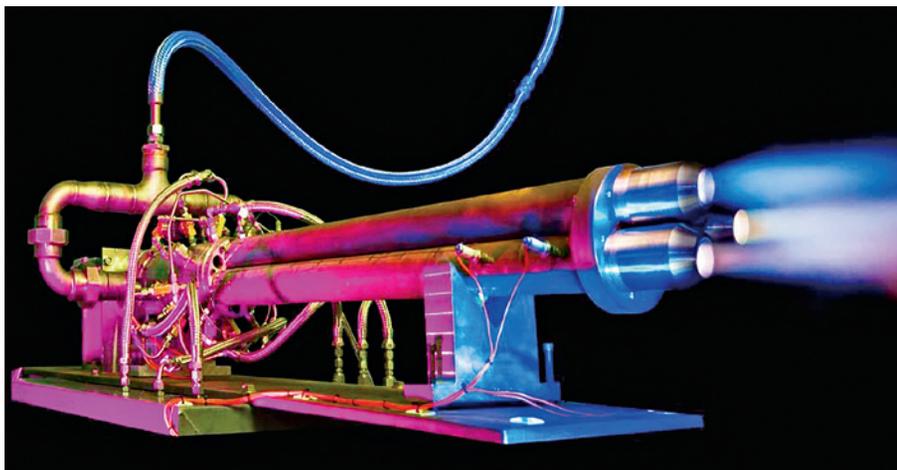
计算工具

本计划所有重大挑战领域的产品都应当考虑由发动机数字孪生技术和寿命循环产生机制所带来的敏捷性、决策速度和互用性等方面的收益。重点领域包括简化的机上模型，更高的处理能力，生成可行决策所需的数据获取、采集和存储，光纤通信，先进计算/处理方法，带有嵌入式传感器、软件、网络连通性的测试设备，带有机下飞行平台模型/工具的数据阵列。

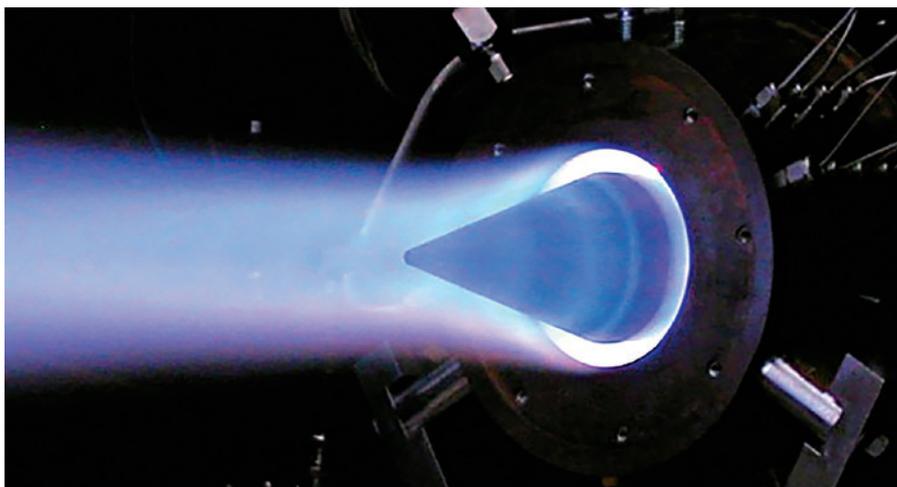
ATTAM计划的运行特点 与VAATE计划的衔接与协调

VAATE计划第三阶段将会持续到2023年，与ATTAM第一阶段会存在6年左右的重合期，包括自适应发动机技术、高效中小尺寸推进和极高效发动机等在两个计划中都有安排，但二者的重点和技术成熟度目标会有所差异。

VAATE计划对自适应发动机技术的研发主要是低压部件，已经实现整机技术验证并转入工程验证机阶段，由GE公司和普惠公司分别开展XA100/101的研制和试验。ATTAM计划则将重点转到自适应核心机技术的研发，很大可能就是2016年披露的“空中优势自适应推进技术”(ADAPT)计划，初始焦点将放在部件研发和风险降低上，为核心机及发动机验证机试车做准备。“极高效发动机”有可能是HEETE项目的后续，后者的重点是部件设计和风险降低试验，技术成熟度目标是TRL4级，在ATTAM计划中有可能进一步提高成熟度，或推进其他关键技术成熟，为未来核心机和验证机试验做好准备。



GE公司脉冲爆震试验



旋转爆震燃烧室

为了避免重复、提高效率，美国国防部要求每个申报方都制订一份协调VAATE和ATTAM研究工作的“先进涡轮推进规划”(ATPP)，在获得政府批准后方可提交申请。此外，ATTAM计划下的“综合推进、动力和热管理(INPPAT)演示验证”项目已经先期启动，并为“能量优化飞机”(EOA)和“兆瓦级未来空中优势”计划提供支持。

ATTAM计划的创新技术

该计划纳入了一些称之为“革命性”和“颠覆性”的新技术和新

概念。首先是完整的综合动力与热管理要素，以满足未来飞机和发动机支撑更多电力系统、定向能武器、功率更大的传感器等需求，同时提高推进效率和飞行器自身的动力水平。其次是高效涡轮-电推进技术，该技术已经在民用航空研究领域风生水起，GE、罗罗、赛峰和霍尼韦尔等公司均开展了相关技术研究，预计2030年后将用于商业航空，美国空军也积极加入了这一领域的研发。第三是纳入了“增压燃烧”概念，一般多采用定容燃烧方式，与定压

燃烧相比能够降低油耗最高达15%，可行的概念包括脉冲爆震、旋转爆震以及爆震波转子发动机等。这种燃烧技术已开展了较长时间的研究，但一直没有取得重大突破。目前俄罗斯也开始了相关技术的研发和试验，ATTAM计划将有力推动这一技术向实用化迈进。此外ATTAM计划还加强了设计方法和研发能力的要求，并首次将材料与制造技术、计算工具分别列为单独研究领域，而喷气噪声降低是在正式公告中才出现的新需求，反映了空军对环境特性和信号特征控制方面越来越重视。

经费规模和参与范围

ATTAM计划第一阶段从2018—2026财年，总经费为7亿美元。初始合同到2024财年，初始授予经费1.57亿美元。合同采用不确定交付物/不确定数量(ID/IQ)形式，初始订单的类型包括成本加固定费、成本分摊和成本补偿等。合同期为96个月，首批订单期限为60个月。该计划的合同商均要求为美国企业，并鼓励1500人以下的小企业参与申请。同时提供政府试验设施供合同商使用，并列出了AFRL推进系统部涡轮发动机分部下属10个不同实验室的15套设备，包括压气机、燃烧室、涡轮、机械系统、热交换、热通量测量等实验室，以及燃烧与激光诊断研究综合设施、爆震发动机研究试验台、发动机环境研究试验台、国家航空航天燃料研究综合设施、涡轮发动机疲劳试验台、低速风洞等一批综合实验设施。

航空动力

(晏武英，中国航发研究院，高级工程师，主要从事航空发动机战略与情报研究。)